



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO TECNOLÓGICO – CTC**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – ECV**

**Dario Menegasso Pires**

**MODELAGEM DE UM SISTEMA ELÁSTICO LINEAR DE  
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS E VALIDAÇÃO POR MEIO DO MÉTODO  
DE ELEMENTOS FINITOS**

**Florianópolis**

**2018**

**DARIO MENEGASSO PIRES**

**Modelagem de um sistema elástico linear de pavimentos flexíveis e  
validação por meio do método de elementos finitos**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado pelo acadêmico Dario  
Menegasso Pires à banca examinadora  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Federal de Santa  
Catarina como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Civil**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

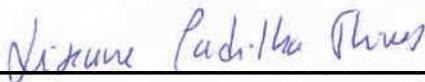
MODELAGEM DE UM SISTEMA ELÁSTICO LINEAR DE PAVIMENTOS  
FLEXÍVEIS E VALIDAÇÃO POR MEIO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do grau de Engenharia Civil, sendo aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 28 de junho de 2018

Profª Lia Caetano Bastos, Drª.  
Coordenadora de TCC

**Banca examinadora:**



---

Profª. Liseane Padilha Thives, Drª.

Orientadora

Gracieli Dienstmann, Drª.

Membro

Emmanuelle Stefânia Holdefer Garcia, Ms.

Membro

## **Agradecimentos**

Primeiramente aos meus pais, Otto e Mariza. Pelo apoio, que sempre respeitou minhas escolhas. Pelo exemplo, que sempre me guiou pelo melhor caminho. E acima de tudo a inspiração, na qual busco me tornar pelo menos metade das pessoas que vocês são.

Aos meus irmãos, Otto e Shanisis, pelas brigas e sorrisos, que nos mostram que somos cada vez mais fortes, enquanto lembrarmos que nem mesmo a distância ou o silêncio pode enfraquecer nossos laços.

À professora orientadora, e amiga Liseane, pela orientação e apoio durante toda esta jornada. Obrigado por não desistir deste aluno, sem você este trabalho nunca ficaria pronto.

À professora Gracieli pelas dúvidas esclarecidas durante a elaboração do trabalho, bem como por aceitar o convite para participar da banca examinadora deste trabalho.

À doutoranda Emmanuelle por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora deste trabalho.

Aos meus amigos, levarei para sempre um pedaço de cada um comigo, os momentos que compartilhamos jamais serão esquecidos, vocês são a minha força, me espelho um pouco em cada um de vocês, nos estudiosos, os extrovertidos, aqueles que sempre tentam tirar o melhor da cada situação, os que não suportam minhas piadas, e aqueles que fingem gostar delas, cada um de vocês é especial a sua maneira, e eu não seria o mesmo sem vocês.

A todos meus professores, do fundamental, do ensino médio e da graduação, que colaboraram para a minha formação, e me forneceram os conhecimentos com os quais me amparo.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho, direta ou indiretamente. Vocês sempre serão os meus Gigantes, Muito Obrigado!

## Resumo

No Brasil, desde a década de 1960, os pavimentos flexíveis são dimensionados através do método oficial do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), cuja última atualização se deu na década de 1980. Este método, desenvolvido quando a capacidade computacional era pouco elevada, baseia-se na metodologia empírica de dimensionamento de proteção do subleito de deformações excessivas. Com o advento do uso de computadores, os pavimentos passaram a ser dimensionados por métodos empírico-mecanicistas baseados na análise tensão-deformação de sistemas de camadas elásticas. Atualmente, o método de elementos finitos também se apresenta como uma ferramenta capaz analisar as tensões e deformações atuantes na estrutura do pavimento. No entanto, em nível de graduação, seu uso ainda é incipiente. Este trabalho tem por objetivo validar a modelagem de um pavimento flexível dimensionado por meio de um sistema de camadas elásticas através do Método de Elementos Finitos 2D. Para tanto, desenvolveram-se modelagens em 2D de um pavimento flexível, em um modelo axissimétrico e três modelos planos. Como resultado, para as análises 2D serem realizadas, o eixo padrão de roda dupla com 80 kN foi transformado em eixo equivalente com apenas uma roda. Os modelos foram então avaliados, de modo que foi possível realizar a validação de dois dos modelos planos, que obtiveram valores equivalentes às camadas elásticas utilizadas como comparativo.

Palavras chave: dimensionamento, pavimento flexível, método dos elementos finitos, ABAQUS.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1 Objetivos .....	13
1.2 Estrutura do trabalho .....	14
1.3 Limitações .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 Pavimentos Flexíveis .....	15
2.2 Métodos de Dimensionamento .....	16
2.2.1 Método Empírico.....	16
2.2.2 Métodos Empírico-Mecanicistas .....	18
2.2.2.1 Leis de Fadiga .....	21
2.2.4 Sistema de camadas elásticas, BISAR.....	24
2.3 Método dos Elementos Finitos .....	25
2.3.1 Definições gerais .....	25
2.3.2 Aplicações para pavimentação .....	26
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
3.1 Considerações iniciais.....	33
3.2 Pavimento genérico.....	34
3.3 Eixo Padrão.....	36
3.4 Modelagem pelo Método dos Elementos Finitos.....	37
3.4.1 ABAQUS versão estudante .....	38
3.4.2 Modelagem Plana 2D .....	38
3.4.3 Modelagem Axissimétrica 2D .....	39
3.4.4 Processo de realização da modelagem.....	40
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
4.1 Eixo Padrão equivalente.....	65
4.2 Modelos 2D .....	67
4.3 Deformações .....	69
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>

## LISTA FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Exemplo da estrutura de um pavimento flexível.....	16
<b>Figura 2</b> - Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista.....	19
<b>Figura 3</b> - Deformação de tração no sentido longitudinal .....	19
<b>Figura 4</b> - Deformação de tração no sentido transversal .....	20
<b>Figura 5</b> - Trinca isolada transversal .....	22
<b>Figura 6</b> - Trinca isolada Longitudinal.....	22
<b>Figura 7</b> - Trinca interligada tipo "jacaré" .....	23
<b>Figura 8</b> - Representação Axissimétrica .....	27
<b>Figura 9</b> - Modelo Axissimétrico .....	28
<b>Figura 10</b> - Modelo Plano 2D.....	29
<b>Figura 11</b> - Modelo 3D.....	29
<b>Figura 12</b> - Fluxograma da metodologia.....	34
<b>Figura 13</b> - Pavimento genérico.....	35
<b>Figura 14</b> – Vistas do eixo padrão .....	37
<b>Figura 15</b> - Corte Longitudinal utilizado no modelo plano.....	39
<b>Figura 16</b> - Propriedades dos materiais – fase 1.....	41
<b>Figura 17</b> - Propriedades dos materiais – fase 2.....	41
<b>Figura 18</b> - Propriedades dos materiais – fase 3.....	42
<b>Figura 19</b> - Propriedades dos materiais – fase 4.....	42
<b>Figura 20</b> - Modelagem da geometria - fase 1.....	43
<b>Figura 21</b> - Modelagem da geometria – fase 2.....	43
<b>Figura 22</b> - Modelagem da geometria – fase 3.....	44
<b>Figura 23</b> - Modelagem da geometria – fase 4.....	44
<b>Figura 24</b> - Definição das seções - fase 1.....	45
<b>Figura 25</b> - Definição das seções – fase 2.....	46
<b>Figura 26</b> - Definição das seções – fase 3.....	46
<b>Figura 27</b> - Definição das camadas do pavimento – fase 1.....	47
<b>Figura 28</b> - Definição das camadas do pavimento – fase 2.....	48
<b>Figura 29</b> - Definição das camadas do pavimento – fase 2.....	48
<b>Figura 30</b> - Atribuição das seções – fase 1.....	49
<b>Figura 31</b> - Atribuição das seções – fase 2.....	49
<b>Figura 32</b> - Atribuição das seções – fase 3 .....	50

<b>Figura 33</b> - Atribuição das seções – fase 4.....	50
<b>Figura 34</b> - Criação da malha – fase 1. ....	51
<b>Figura 35</b> - Criação da malha – fase 2. ....	52
<b>Figura 36</b> - Criação da malha – fase 3. ....	52
<b>Figura 37</b> - Criação da malha – fase 4. ....	53
<b>Figura 38</b> - Criação da malha – fase 5. ....	53
<b>Figura 39</b> - Imposição das restrições – fase 1.....	54
<b>Figura 40</b> - Imposição das restrições – fase 2.....	54
<b>Figura 41</b> - Imposição das restrições – fase 3.....	55
<b>Figura 42</b> - Imposição das restrições – fase 4.....	55
<b>Figura 43</b> - Imposição das restrições – fase 5.....	56
<b>Figura 44</b> - Imposição das restrições – fase 6.....	56
<b>Figura 45</b> - Imposição do carregamento – fase 1.....	57
<b>Figura 46</b> - Imposição do carregamento – fase 2.....	58
<b>Figura 47</b> - Imposição do carregamento – fase 3.....	58
<b>Figura 48</b> - Imposição do carregamento – fase 4.....	59
<b>Figura 49</b> - Imposição do carregamento – fase 5.....	59
<b>Figura 50</b> - Imposição do carregamento – fase 6.....	60
<b>Figura 51</b> - Imposição do carregamento – fase 7.....	60
<b>Figura 52</b> - Etapa de Cálculo – fase 1.....	61
<b>Figura 53</b> - Etapa de Cálculo – fase 2.....	61
<b>Figura 54</b> - Etapa de Cálculo – fase 3.....	62
<b>Figura 55</b> - Etapa de Cálculo – fase 4.....	62
<b>Figura 56</b> - Etapa de Cálculo – fase 5.....	63
<b>Figura 57</b> - Etapa de Cálculo – fase 6.....	63
<b>Figura 58</b> - Etapa de Cálculo – fase 7.....	64
<b>Figura 59</b> - Representação do eixo padrão.....	66
<b>Figura 60</b> - Representação do eixo padrão equivalente.....	66
<b>Figura 61</b> - Dimensões dos modelos planos 2D.....	68
<b>Figura 62</b> - Dimensões do modelo axissimétrico.....	69
<b>Figura 63</b> - Deformação de tração do modelo axissimétrico.....	71
<b>Figura 64</b> - Deformação de tração do modelo plano de 10 x 30 m.....	71
<b>Figura 65</b> - Deformação de tração do modelo plano de 20 x 30 m.....	71
<b>Figura 66</b> - Deformação de tração do modelo plano de 20 x 60 m.....	72

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Propriedades das camadas do pavimento genérico .....	35
<b>Tabela 2</b> - Resultados para os modelos planos .....	69

## 1. INTRODUÇÃO

Os pavimentos flexíveis constituem o tipo mais empregado no Brasil, cujo meio de transporte predominante é o rodoviário. No entanto, os revestimentos das rodovias brasileiras, em geral, não atingem a vida útil de projeto e apresentam prematuramente defeitos estruturais. Os principais defeitos dos revestimentos asfálticos são a fadiga e a deformação permanente.

Um dos principais desafios relativos ao dimensionamento de pavimentos flexíveis diz respeito ao tipo de método empregado e a identificação e avaliação adequada dos parâmetros estruturais.

Um projeto de Engenharia busca qualidade e menor custo possível e em projetos de Engenharia Rodoviária, isto não é diferente. Ao longo do tempo os métodos de dimensionamento evoluíram a partir de base empírica e foram aprimorados à análise mecanicista.

Os primeiros métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis foram desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial e derivam de conhecimentos empíricos, com fundamentos baseados na observação e uma pequena vertente mecanicista.

O método empírico de dimensionamento de pavimentos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) foi desenvolvido na década de 1960 e aprimorado na década de 1980. Suas bases são o Índice de Suporte Califórnia (ISC) do subleito e a definição do parâmetro de tráfego número N (número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf), obtidas através de levantamentos de tráfego e projeções de demanda. Apesar de antigo, este é o método oficial brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Com ele é obtida uma estrutura capaz de proteger o subleito de deformações excessivas por meio de relações empíricas entre o número N (tráfego), e o Índice de Suporte Califórnia (ISC) do subleito durante um período de projeto, em geral de 10 anos.

Os métodos empíricos não mais se adéquam à atual realidade de cargas e volume de tráfego atuante. Com o aumento dos veículos rodando sob os pavimentos, bem como as cargas transportadas, o desenvolvimento de novos métodos de dimensionamento passaram a serem necessários, abordando de maneira mais representativa, às cargas, o clima e seus efeitos nos pavimentos. Desta forma, desenvolveram-se os métodos empírico-mecanicistas de

dimensionamento que contam com modelos de comportamento da estrutura do pavimento.

Os métodos empírico-mecanicistas possuem em sua base a consideração de camadas elásticas, sendo as camadas do pavimento tidas como homogêneas lineares e isotrópicas. Nesta situação, a carga que atua sobre o sistema é considerada estática. Estas aproximações são efetivas, em casos que o comportamento do sistema analisado responda como um sistema elástico linear, o que nem sempre é representativo do que ocorre em campo, a situação real. A situação real não corresponde à esta idealização considerada nestes elementos, as camadas são compostas por meios não homogêneos e cargas dinâmicas (HADI, BODHINAYAKE, 2003).

Com a ideia de preencher as lacunas existentes na abordagem empírico-mecanicista, muitos pesquisadores direcionaram seus estudos para o método dos elementos finitos. Este método possibilita a consideração da heterogeneidade das camadas, os efeitos não lineares, a análise do comportamento dinâmico, e a ortotropia da estrutura, obtendo, assim, resultados que podem ser mais representativos da condição em campo (HADI, BODHINAYAKE, 2003).

Por meio de programas de camadas elásticas e do método de elementos finitos é possível prever o estado de tensões e de deformações de um pavimento em serviço. Estes métodos podem ser utilizados, por exemplo, para controle de fadiga do revestimento asfáltico, base dos métodos empírico-mecanicistas. Neste caso é determinada a deformação específica de tração que ocorre na base da camada asfáltica (revestimento ou ligação). Posteriormente, por meio de leis de fadiga, é possível comparar o número de ciclos que levam o material à ruptura com o número  $N$  de projeto e assim, dimensionar o pavimento. No entanto, ainda é importante realizar um comparativo entre os dois tipos de abordagem.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo validar os valores de deformação de tração de camadas elásticas obtidos através de um sistema de camadas elásticas, desenvolvidas no *software* Bisar, através do uso de elementos finitos.

Em geral, em cursos de graduação, o contato do aluno com a teoria e aplicação de método dos elementos finitos e modelagens, principalmente na área de pavimentação ainda é incipiente. Como resultado, os alunos desconhecem e não aplicam esta ferramenta, extremamente útil para solução de diversos problemas

encontrados na Engenharia. Busca-se, então, aprofundar os conhecimentos nesta metodologia, realizando-se uma iniciação e primeiro contato com ela através deste trabalho com a abordagem de pavimentos flexíveis, que irá produzir modelos baseados no método dos elementos finitos, e compará-los com as técnicas de dimensionamento tradicionais.

## 1.1 Objetivos

### ***Objetivo geral***

Validar um pavimento flexível dimensionado por meio de um sistema de camadas elásticas através do Método de Elementos Finitos 2D.

### ***Objetivos específicos***

De modo a alcançar o Objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Criar um modelo 2D de elementos finitos representativo de um pavimento flexível;
- Imposição adequada e representativa da carga em modelos 2D;
- Obtenção de resultados compatíveis de forma a representar modelos de camadas elásticas;
- Promover o uso do método de elementos finitos como uma ferramenta acessível para uso em pavimentação.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta um panorama geral das motivações, por meio de uma introdução ao tema, da apresentação dos objetivos, bem como das principais limitações encontradas em sua elaboração.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica que aborda os mecanismos necessários à realização e compreensão dos procedimentos utilizados para fundamentação do método.

O terceiro capítulo apresenta o método e os procedimentos adotados para alcançar os objetivos, explicando e ilustrando de forma detalhada o uso da ferramenta utilizada.

O quarto capítulo mostra os resultados e a discussão após a aplicação do método.

O quinto capítulo apresenta as considerações finais, que faz uma avaliação geral do que foi alcançado neste trabalho, bem como são mostradas sugestões de possibilidades para trabalhos futuros.

Ao final são apresentadas as referências que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho.

## 1.3 Limitações

A principal limitação encontrada durante a realização deste trabalho é a limitação de 1000 nós da versão estudantil do *software* ABAQUS nas suas modelagens. Desta forma os modelos realizados ficam limitados a modelos em duas dimensões, visto que a modelagem em três dimensões demandaria um número maior de nós. Como não é possível realizar uma análise em campo que represente os modelos aqui apresentados, os resultados serão apenas teóricos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos necessários para a compreensão desta pesquisa, sua fundamentação, mecanismos e exemplos de aplicação, levados em consideração durante o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 Pavimentos Flexíveis

O pavimento flexível é composto por uma camada de revestimento em material betuminoso sobre camadas granulares ou betuminosas assentes sobre o solo de fundação denominado de subleito. Esta estrutura de camadas é denominada de flexível porque a carga aplicada no revestimento é transmitida para as demais camadas. Assim, o projeto de um pavimento flexível é baseado nas características de distribuição de carga em um sistema de camadas.

Segundo Manual de Pavimentação do DNIT:

*Pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou um terreno de fundação, a qual é designada de subleito. (BRASIL, 2006).*

Os pavimentos flexíveis conforme apresentado na Figura 1 são compostos por camadas asfálticas (revestimento) e camadas granulares (base e sub-base) assentes sobre o solo de fundação (subleito).

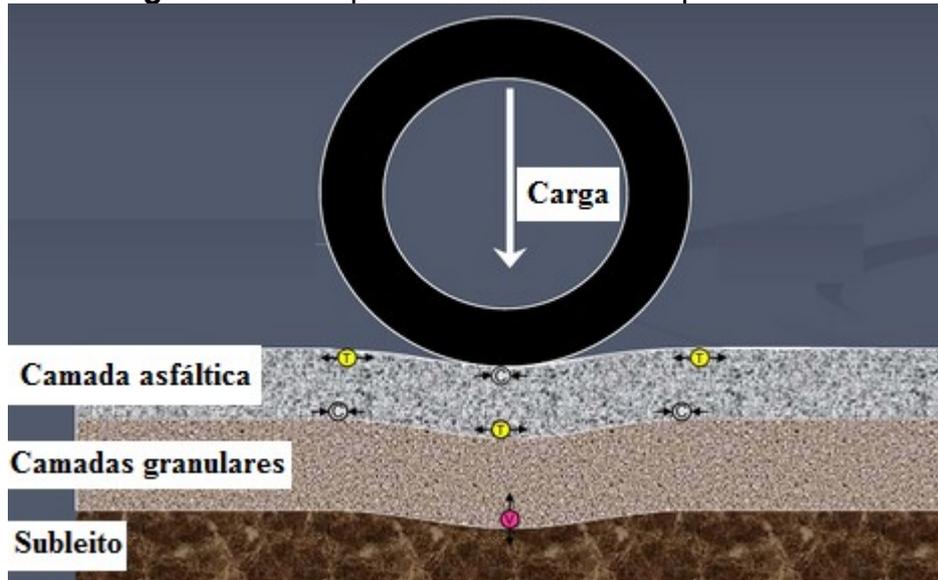
A função da estrutura é de resistir aos esforços originados pelo tráfego de veículos, e do clima, de modo a melhorar as condições de rolamento, proporcionando ao usuário conforto e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Pavimentos flexíveis são aqueles nos quais todas as camadas sofrem deformação elástica devido ao carregamento aplicados, resultando em uma distribuição desta carga entre todas as camadas componentes, e com parcelas equivalentes (BRASIL, 2006).

Os pavimentos flexíveis possuem seu revestimento composto por uma mistura constituída por agregados e ligantes asfálticos, as misturas asfálticas. A constituição desse tipo de pavimento é usualmente formada por quatro camadas principais: o revestimento (camada asfáltica); a base; sub-base, e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As camadas de base e sub-base são usualmente compostas por material granular, a primeira tem como função aliviar os esforços sofridos pelo revestimento, funcionando como suporte estrutural, enquanto a segunda visa impedir a passagem de solo do subleito para a base, enquanto também atua como complemento à camada de base (BRASIL, 2006).

**Figura 1** - Exemplo da estrutura de um pavimento flexível



Adaptado de: Orr (2011)

## 2.2 Métodos de Dimensionamento

### 2.2.1 Método Empírico

No Brasil o método oficial para dimensionamento de pavimentos é o método do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), denominado DNIT/81. O método foi desenvolvido na década de 1960 por meio de estudos americanos de 1940 e posteriormente aperfeiçoado na década de 1980. Este método se baseia na proteção do subleito à deformações excessivas, que tem sua capacidade de suporte avaliado pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC). Seu desenvolvimento teve base na experiência do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE), e em experimentos da *American Association of State Highway and Transportation Officials*, AASHTO (DNER, 1981).

No método, a proteção do solo de fundação (subleito) a deformações plásticas excessivas é calculada para um período de projeto, em geral, de 10 anos. A capacidade de suporte dos solos e dos materiais granulares das camadas do pavimento, exceto as betuminosas, são avaliadas pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC) preconizado pela norma DNER – ME 049 (1994). A energia de compactação varia de acordo com o indicado em projeto.

O método contempla também a carga atuante, dada pelo tráfego. O dimensionamento pelo método DNIT/81 em relação ao tráfego se dá pelo cálculo do número N, número equivalente de operações de um eixo tomado como padrão, para o período de projeto. Este número é determinado através de projeções de demanda, e conversões dos eixos que irão operar para um número equivalente de operações no eixo padrão. No Brasil, o eixo tomado como padrão é o simples de roda dupla de 8,2 tf (80 kN).

Após determinado o número N, é avaliada a resistência dos componentes que serão utilizados para compor o pavimento através do ISC. Caso os materiais cumpram os valores mínimos e condições estabelecidos pelo método, são então realizadas as metodologias de cálculo. Atualmente a normativa de dimensionamento está publicada no Manual de Pavimentos Flexíveis do DNIT.

Os valores de ISC e número N são assim utilizados em conjunto com uma série de equações empíricas, que determinam a relação entre a espessura das camadas e as variáveis de projeto. Desta forma observa-se que o dimensionamento não leva em considerações as tensões ou deformações geradas pelas cargas aplicadas, o que pode muitas vezes gerar um dimensionamento inadequado à situação a qual o pavimento será submetido.

Uma complementação ao método DNIT/81, pode ser feita com base nas considerações das deformações e tensões, desta forma é possível realizar análises capazes de, por exemplo, prever o fendilhamento por fadiga dos pavimentos. Os conhecimentos empíricos, em conjunto a estas análises do comportamento mecânico dos pavimentos são conhecidos por método empírico-mecanicista.

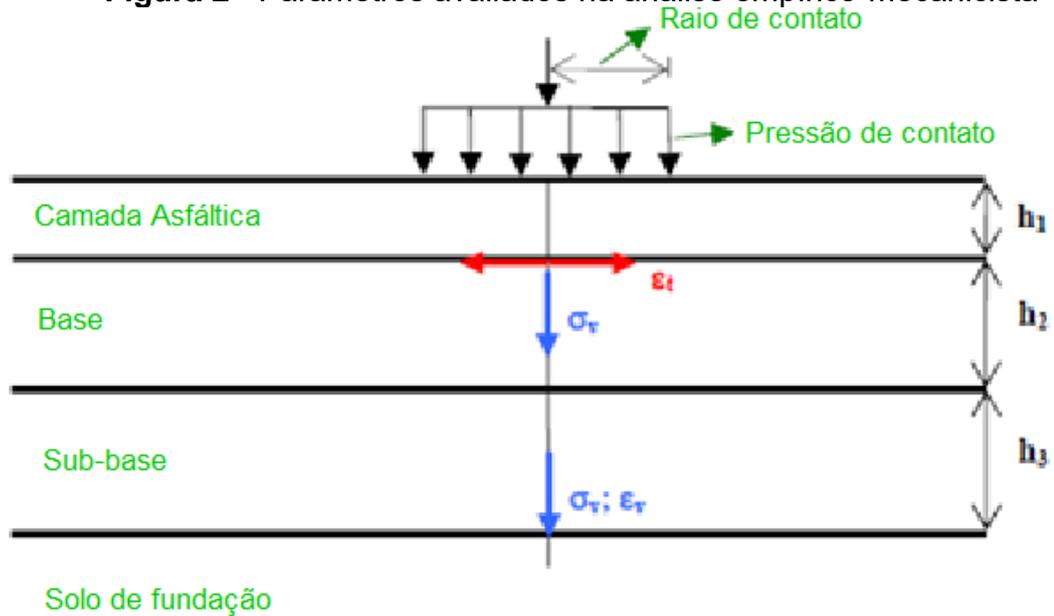
### 2.2.2 Métodos Empírico-Mecanicistas

Nos métodos empírico-mecanicistas o dimensionamento considera como base dois tipos de deterioração da camada asfáltica: (i) o fendilhamento por fadiga nas camadas betuminosas, devido ao tráfego e às ações climáticas; (ii) as deformações permanentes no topo da camada de subleito. Observa-se que o defeito de deformação permanente não é um parâmetro de cálculo. Neste caso, considera-se um percentual de afundamento máximo da camada asfáltica, medida em ensaios de laboratório e estabelecida no projeto ou por órgãos rodoviários (FONTES, 2009).

Os procedimentos adotados nos métodos empírico-mecanicistas, buscam atender exigências técnicas e econômicas, mas assumindo-se riscos controlados. Este método de dimensionamento baseia-se, na análise das características de deformabilidade dos materiais constituintes da estrutura do pavimento analisado, determinando-se de forma analítica, a partir de tensões impostas (tráfego), as respectivas respostas, ou seja, a deformação ou a deflexão. Avalia-se o cumprimento dos critérios de ruína pré-estabelecidos. Estes critérios são verificados no intuito de limitar a possibilidade de degradação da estrutura durante a vida útil de projeto, restringindo-se assim as tensões que serão impostas de modo que não ultrapassem os limites calculados (LOPES, 2009).

Os principais parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista estão representados na Figura 2: (i) deformação de tração ( $\epsilon_t$ ) na fibra inferior da camada betuminosa, para controle do fendilhamento por fadiga; (ii) estado de tensão no topo da camada de bases, importante em estruturas com revestimentos delgados para se controlar a ruptura por cisalhamento; (iii) tensão ( $\sigma_v$ ) ou deformação vertical ( $\epsilon_v$ ) no topo do solo de fundação (subleito) para controle da deformação permanente (FONTES, 2009).

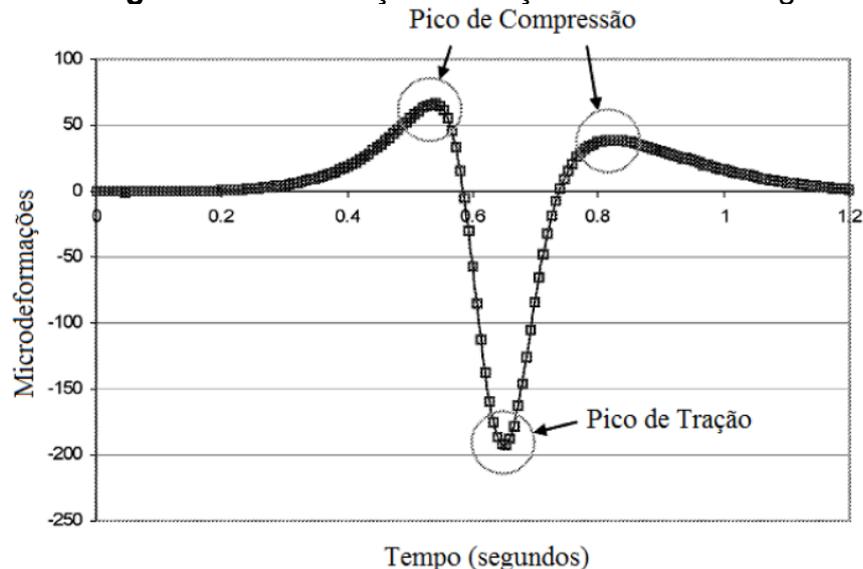
**Figura 2** - Parâmetros avaliados na análise empírico-mecanicista



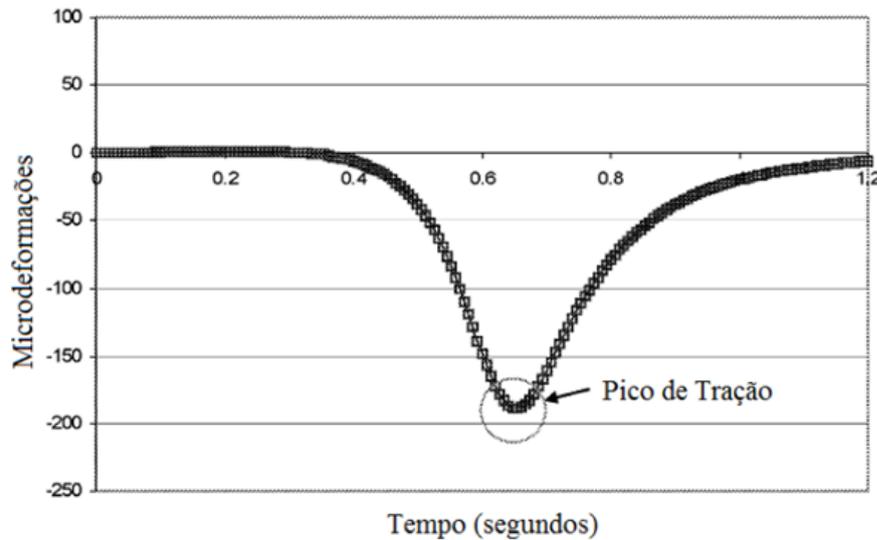
Fonte: Adaptado de Fontes (2009)

As deformações apresentadas na fibra inferior da camada asfáltica se apresentam de maneiras diferentes para os sentidos longitudinal e transversal. Enquanto o sentido transversal é afetado apenas por tração, o longitudinal possui uma alternância entre tração e compressão, apresentando uma configuração sinusoidal para a mesma, ver Figura 3 e Figura 4 (PERRET, 2003). Por este motivo, de forma a representar o sinal de deformação de campo, a análise é realizada no sentido longitudinal. Em ensaios de fadiga em tensão alternada, o mesmo sinal ocorre.

**Figura 3** - Deformação de tração no sentido longitudinal



Fonte: Adaptado de Perret (2003)

**Figura 4 - Deformação de tração no sentido transversal**

Fonte: Adaptado de Perret (2003)

O estado de tensão e de deformação ao qual o pavimento está submetido é calculado por métodos computacionais, que simulam a resposta da estrutura com o uso de sistemas de camadas elásticas, que podem ter resposta linear ou não linear, ao sofrer a ação das cargas (FONTES, 2009).

Segundo Fontes (2009), quando for considerada uma análise linear, considera-se que a camada corresponde a um meio homogêneo, isotrópico, e de resposta elástica linear. Este modelo simplificado é capaz de reproduzir as tensões e deformações. Em 1885, Boussinesq desenvolveu uma teoria de cálculo para um semi-espaço, homogêneo, isotrópico, e elástico linear. A tensão em qualquer ponto de um sistema elástico, bem como o deslocamento superficial, poderia ser definida para uma carga atuante em qualquer ponto da superfície deste sistema. A partir desta teoria, foi desenvolvido em 1945 por Burmister soluções para sistemas compostos por três camadas. Com o advento dos programas computacionais de análise tensão-deformação, estas soluções puderam ser utilizadas em estudos envolvendo múltiplas camadas.

De um modo geral as principais considerações que devem ser feitas para a resolução de problemas envolvendo sistemas de camadas elásticas, são as seguintes: (i) As camadas são homogêneas, isotrópicas e elástico-lineares, com módulo elástico ( $E$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ); (ii) as camadas são admitidas infinitas na direção lateral e finitas em profundidade; (iii) a camada final (solo de fundação) é considerada infinita em profundidade (FONTES, 2009).

### 2.2.2.1 Leis de Fadiga

Quando a roda de um veículo passa sobre um pavimento, esta transmite a ele seus esforços, as ações tangenciais acabam por influenciar na evolução da textura da superfície, ou seja, no polimento dos agregados e desagregação de agregados da mistura. Por outro lado, as ações verticais, afetam o funcionamento estrutural do pavimento (BRANCO, 2005).

Conforme Branco (2005), a ação das cargas transmitidas ao pavimento acaba por provocar a deformação das camadas do pavimento, que depende do estado de tensões desenvolvido nas camadas do pavimento em correspondência às diferentes características de resposta dos materiais de cada camada a estes esforços.

Quando a roda se afasta do pavimento, ele volta a seu estado de repouso, contudo, por suas camadas não serem perfeitamente elásticas, elas passam a manter parte da deformação a qual foram submetidas, a constante sucessão destes esforços provoca o acúmulo destas deformações. As deformações causadas, em geral, são inferiores ao necessário para produzir a ruptura do pavimento, contudo após sucessivas aplicações de carga atinge-se um número limite de aplicações da carga, que provoca a perda das capacidades estruturais do pavimento, este processo é denominado de fadiga dos materiais. A fadiga de um material pode ser traduzida em uma “lei de fadiga”, que é uma relação entre a deformação provocada por um carregamento, e o número limite de vezes que este carregamento pode ser repetido, até que um dado material seja levado a ruína. Ressalta-se que a área mais vulnerável a fadiga do pavimento, encontra-se na fibra inferior do revestimento asfáltico, ponto de maior deformação de tração. (BRANCO, 2005).

Segundo a norma do DNIT que estabelece a terminologia de defeitos em pavimentos flexíveis, TER 005/2003, os principais defeitos ocasionados em decorrência da fadiga das camadas são: trincas isoladas: transversais e longitudinais; e de trincas interligadas, conhecidas como “Jacaré”, como ilustram as Figuras 5, 6 e 7.

**Figura 5 - Trinca isolada transversal**



Fonte: Brasil (2003)

**Figura 6 - Trinca isolada Longitudinal**



Fonte: Brasil (2003)

**Figura 7 - Trinca interligada tipo "jacaré"**



Fonte: Brasil (2003)

Diversas organizações internacionais estabelecem normativas para a determinação da vida de fadiga das misturas asfálticas em laboratório. Cada qual varia em termos de tipo de aplicação de carga e tipo de corpo de prova.

Um dos ensaios capazes de determinar a fadiga de uma mistura asfáltica é aquele no qual a deformação é controlada, nestes ensaios varia-se a força, que reduz gradualmente com o decorrer do ensaio, mantendo-se certo nível de deformação. Este ensaio é finalizado quando a rigidez da amostra atinge 50% de seu valor inicial (ZEIADA, 2012).

Os resultados correspondentes aos ensaios de deformação controlada, podem ser expressos por uma relação entre o número de ciclos realizados e a deformação resultante de acordo com a Equação 1 (MONISMITH, 1981):

$$N = a \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon t} \right)^b \quad (1)$$

N = número de ciclos realizados no ensaio;

$\varepsilon t$  = deformação de tração da fibra inferior do pavimento;

a e b = constantes características da mistura ensaiada e determinadas experimentalmente.

Os ensaios a deformação controlada são realizados quando na estrutura do pavimento, a camada betuminosa apresenta espessura de até 15 cm, o que em geral, ocorre nos pavimentos brasileiros.

#### 2.2.4 Sistema de camadas elásticas, BISAR

A avaliação da deformação específica de tração na fibra inferior das camadas asfálticas é determinada por meio de programas computacionais. Para uma determinada estrutura, o programa, denominado de sistema de camadas elásticas, determina a deformação de tração na fibra inferior da camada. A partir da lei de fadiga da mistura asfáltica, é possível determinar o número de ciclos que levará o material a ruptura estabelecida e compará-lo com o número de solicitações do tráfego, dada pelo número  $N$ , para o período de projeto.

Existem diversos programas computacionais desenvolvidos, como por exemplo, ELSYM; FLAPS2, EVERSTRESS, WESLEA E BISAR.

O *software* BISAR foi desenvolvido pela *Shell International Oil Products B. V.*, e é utilizado para auxiliar o dimensionamento de pavimentos flexíveis, uma vez que calcula as tensões, as deformações e os deslocamentos através de um sistema de camadas consideradas elásticas. As premissas do programa BISAR são as seguintes (SHELL, 1998):

- O sistema consiste em camadas horizontais com espessuras uniformes, finitas e posicionadas sob um semi-espaco infinito que é o solo de fundação (subleito);
- Os materiais das camadas são considerados homogêneos e isotrópicos;
- As camadas são consideradas com extensão horizontal infinita;
- Os materiais são considerados elásticos e possuem relação tensão-deformação linear.

O carregamento do sistema é realizado através de múltiplas cargas uniformes distribuídas em áreas circulares, sendo possível considerar cargas verticais e horizontais. Como dados de entrada de modo a realizar os cálculos são necessárias os seguintes parâmetros:

- Espessura de cada uma das camadas;
- Módulo de Young;
- Coeficiente de Poisson;
- Definição da quantidade de cargas aplicadas e sua localização, bem como sua característica, através de um desses dois pares: Tensão e força, força e raio ou tensão e raio;
- É opcional o componente horizontal da carga, que deve ser acompanhado de sua direção;
- A localização dos pontos no qual se deseja saber os resultados (tensão, deformação e deslocamento).

O projetista opta pelos elementos de avaliação, ou seja, tensão, deformação e deslocamento. Para a análise da vida de fadiga, considera-se a deformação e tração que ocorre na fibra inferior da camada betuminosa.

O sistema de camadas elásticas é a forma mais simples de determinação dos parâmetros necessários ao dimensionamento, através do qual é possível estabelecer uma relação com o comportamento mecânico verificado em laboratório.

Apesar de não ser uma ideia nova na análise de diversos materiais, o Método dos Elementos Finitos (MEF) não têm grande aplicação em cursos de graduação para avaliação e dimensionamento de pavimentos. Considerando o amplo uso do sistema de camadas elásticas, a validação desta metodologia com a do MEF é importante.

## 2.3 Método dos Elementos Finitos

### 2.3.1 Definições gerais

Para realizar o estudo de sistemas físicos, usualmente se utilizam modelos em escala reduzida ou modelos matemáticos. O avanço dos métodos computacionais, e da ciência, tem aumentado a aplicabilidade e eficiência dos métodos matemáticos, passando a proporcionar modelagens realísticas e confiáveis, com aplicações práticas para a engenharia, e com custos mais baixos que modelos físicos. Embora

se tratem de aproximações, a solução de um modelo matemático ainda é tida como exata (SORIANO,2003).

Segundo Soriano (2003), estes modelos matemáticos requerem normalmente estruturas de soluções, entre elas, o Método dos elementos finitos. Esse método foi desenvolvido para a análise de meios contínuos, o que possibilita a análise da maior parte dos problemas de engenharia atuais. De um modo geral a complexidade de um sistema físico é demasiada elevada para ser analisada de forma exata, isto leva a uma série de hipóteses simplificadoras, que são adotadas de modo a criar um modelo matemático aproximado.

Existem vários *softwares* que são utilizados para a realização de modelagens através do método dos elementos finitos, entre eles, Abaqus, Ansys, COMSOL, MSC Adams, Adina, Lisa, entre outros. Estas modelagens podem ser realizadas tanto em duas quanto em três dimensões, afetando diretamente a representatividade da modelagem.

De acordo com Assan (2003), o método dos elementos finitos (MEF) comumente utilizado é baseado do método de Rayleigh-Ritz, e prevê a divisão do sistema de análise em pequenas regiões, chamadas de elementos finitos, tornando um meio contínuo em discreto. Esta divisão do domínio é denominada de rede de elementos finitos, os elementos finitos podem ter seus valores variáveis e os pontos de interseção das linhas da rede que delimita cada elemento são chamados de nós.

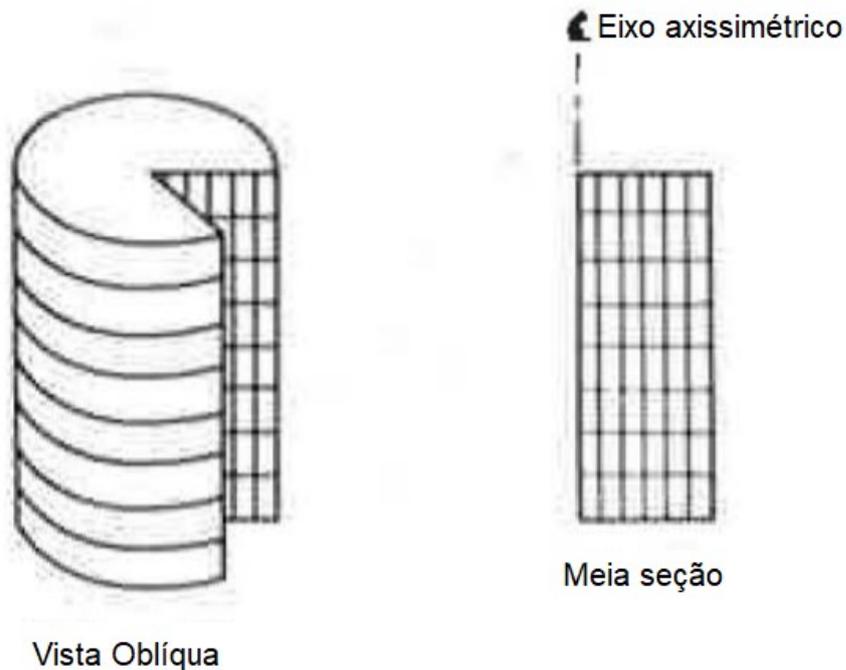
A solução é apresentada para cada subdomínio, ou seja, cada elemento finito, e seu comportamento definido em função de seus nós. Cada elemento possui uma condição de deslocamentos e tensões atribuídas a si e as variações em seus comportamentos são definidas através do deslocamento de seus nós, que através de equações e condições de equilíbrio, definem as incógnitas existentes no sistema (SORIANO, 2003).

### *2.3.2 Aplicações para pavimentação*

O MEF pode ser utilizado como uma importante ferramenta na análise de sistemas de pavimentos, como foi demonstrado pelos estudos de diversos autores, que realizaram modelagens em elementos finitos para diferentes finalidades.

Duncan *et al.* (1968), apresentaram uma maneira de modelar pavimentos através da metodologia dos elementos finitos, realizando a avaliação de um modelo axissimétrico. Neste modelo o sistema é analisado como um cilindro, apresentado na Figura 8, a carga é posicionada no centro deste cilindro, distribuída por uma área circular.

**Figura 8 - Representação Axissimétrica**

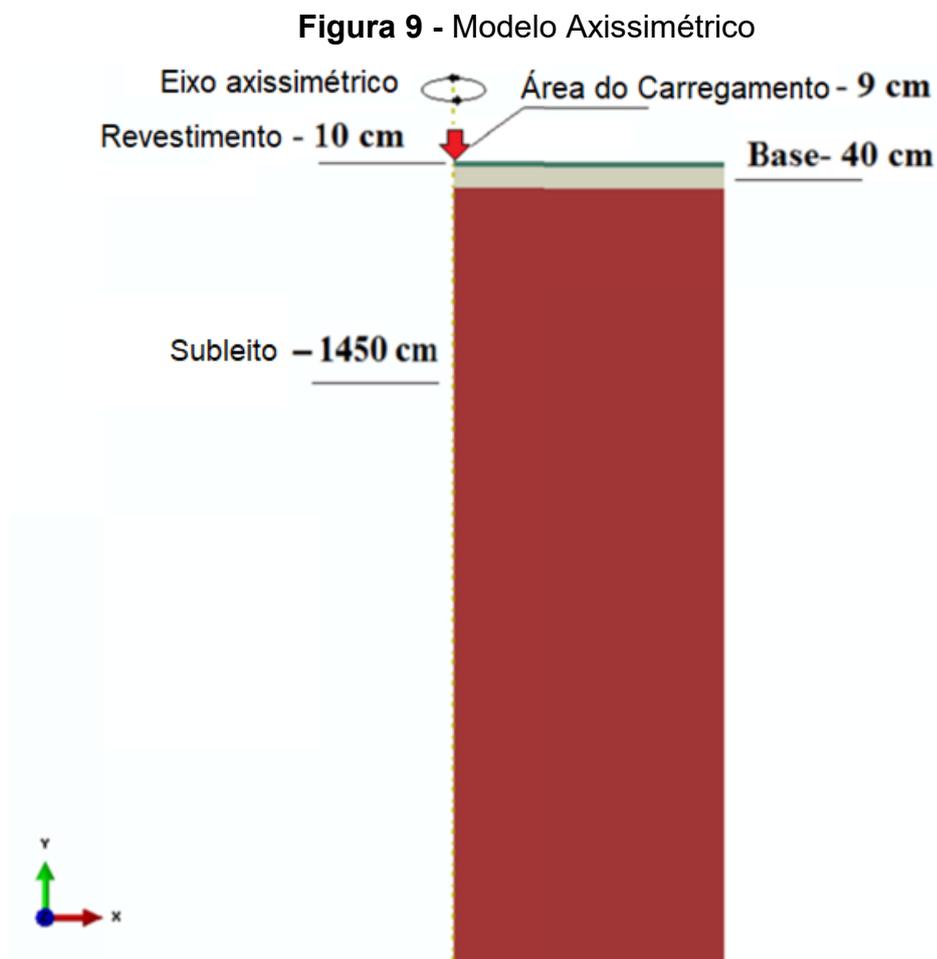


Fonte: Adaptado de Duncan *et. al* (1968)

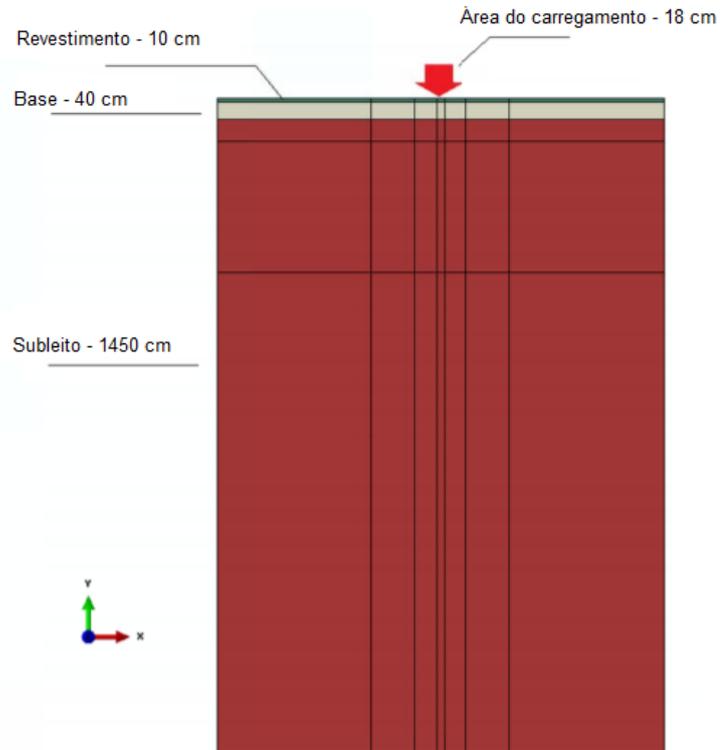
No estudo descrito em Duncan *et al.*, realizaram-se testes de tensões e deformações e definiu-se que para a obtenção de resultados razoáveis seria necessário que as dimensões horizontais do modelo correspondessem a pelo menos 12 vezes o raio no qual é distribuída a carga considerada pelo sistema. Ainda, que a profundidade deveria representar pelo menos 50 vezes o valor desse raio. Ao realizar a análise da deflexão dos pavimentos, também foram obtidos resultados equivalentes aos medidos com o *California Traveling Deflectometer* indicando que seria possível simular pavimentos com um grau significativo de confiabilidade. Assim, o método foi validado pelos resultados de campo.

Um estudo desenvolvido por Ghadimi *et al.* (2013), buscou avaliar o impacto provocado pela geometria do modelo numérico de pavimentos nos seus resultados, avaliando as diferenças entre modelos 2D (plano e axissimétrico) e 3D, com diferentes modelagens e comparando-os com os resultados obtidos pela teoria elástica, buscando a geometria mais representativa para a modelagem de

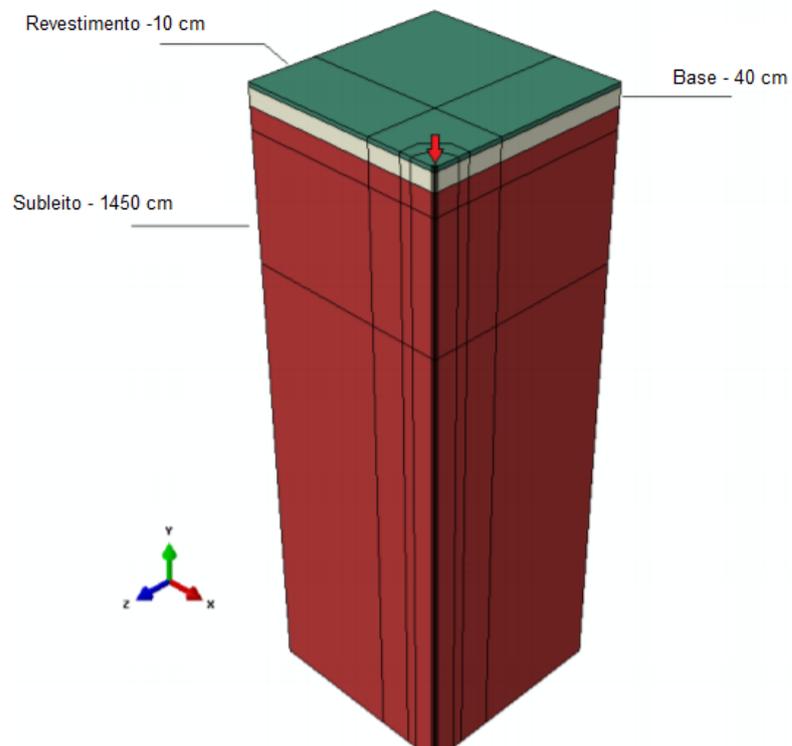
pavimentos. Neste estudo, as dimensões horizontais foram de 500 cm para os modelos 3D e axissimétrico, valor que corresponde a 55,55 vezes o raio da área do carregamento (9 cm). O modelo Plano 2D foi dimensionado com 1000 cm na horizontal, um valor que corresponde a 55,55 vezes o comprimento de aplicação da carga nele representada que equivale a duas vezes o raio da área de carregamento considerada nos outros dois modelos (18 cm). As dimensões verticais dos três modelos foram de 1500 cm, valor que corresponde à 166,70 vezes o raio do carregamento aplicado nos modelos 3D e axissimétrico (9 cm). Cada modelo foi composto por uma camada de revestimento asfáltico com 10 cm, uma de base com 40 cm e uma camada para o subleito com 1450 cm. Os modelos desenvolvidos neste estudo são apresentados nas Figura 9, 10 e 11.



Fonte: Adaptado de Ghadimi *et al.* (2013)

**Figura 10 - Modelo Plano 2D**

Fonte: Adaptado de Ghadimi *et al.* (2013)

**Figura 11 - Modelo 3D**

Fonte: Adaptado de Ghadimi *et al.* (2013)

Como resultado, o estudo de Ghadimi *et al.* (2013) mostrou que respostas calculadas para a estrutura do pavimento através da modelagem plana 2D foram muito mais severas que as encontradas para os modelos 3D e Axissimétrico, para deflexão vertical no topo do revestimento asfáltico, deformação horizontal das fibras inferiores da camada asfáltica, deformação e tensão vertical do topo do subleito. Esta severidade resulta do fato de que a carga dos pneus será estendida ao infinito, ou seja, será considerada contínua, o que não representa com precisão as condições normais do carregamento, que idealmente deveria ser considerada elíptica.

Quanto ao modelo axissimétrico, embora seja uma boa aproximação do modelo 3D e tenha resultados equivalentes a este, só é capaz de representar uma única carga distribuída em uma área circular, restringindo desta maneira as análises que podem ser desenvolvidas por este modelo (GHADIMI *et al.*, 2013).

Mais recentemente, Santos *et al.* (2017) desenvolveram um estudo no qual foi utilizado o método dos elementos finitos para simular os efeitos da interface das camadas sobre o desempenho dos pavimentos quanto à fadiga e deformação permanente. Este estudo utilizou do *software* ABAQUS para desenvolver uma modelagem 3D capaz de simular situações de aderência total ou nula entre as camadas de um pavimento. Os materiais foram admitidos homogêneos e isotrópicos. O desempenho do modelo para fadiga e deformação foi desenvolvido por equações empírico-mecanicistas (leis de fadiga e deformação permanente).

O estudo de Santos *et al.* mostrou que ao se considerar a aderência entre as camadas como ligadas, obteve-se resultados que demonstram uma resistência maior que a que é observada em campo, visto que as camadas não possuíam esta característica ao serem implantadas. A análise mostrou a necessidade de consideração da condição de interface entre as camadas de um pavimento flexível, devendo-se considerar as condições que ocorrerão em serviço.

Os estudos de Dunkan *et al.* (1968), Ghadimi *et al.* (2013) e Santos *et al.* (2017), consideraram as camadas dos pavimentos como elástico-lineares. No entanto, há também a possibilidade de aplicação do método dos elementos finitos para a reprodução do comportamento elástico não linear dos pavimentos, o que representaria a situação de maneira mais realística.

Hadi e Bodhinayake (2003), utilizaram o *software* ABAQUS/STANDARD para iniciar um estudo dos efeitos de cargas estáticas e cíclicas em um modelo considerando propriedades lineares e não lineares para às camadas do pavimento. Embora tenha sido o caso de um estudo preliminar os pesquisadores concluíram que quando ignoradas as propriedades não lineares de um pavimento, a possibilidade de que a estrutura não atinja a vida de projeto é extremamente elevada.

Outro estudo importante foi realizado por Mulungye *et al.*(2005), no qual os pesquisadores consideraram as propriedades não lineares dos pavimentos. Neste estudo foi realizada a modelagem de um sistema de pavimentos no *software* ANSYS/ED. Foram utilizados dois modelos 2D, representando a vista lateral e longitudinal do pavimento representado. O modelo longitudinal teve os nós das suas extremidades laterais e inferiores totalmente restringidos, enquanto do modelo transversal teve todos os seus nós restringidos horizontalmente (mantiveram-se livres verticalmente). O modelo foi submetido às cargas cíclicas que simularam vários tipos de cargas e pneus, comparando os resultados com dados obtidos em testes de escala real (MULUNGYE *et al.*, 2005).

Com base no estudo de Mulungye *et al.* (2005) mais uma vez demonstrou-se que os elementos finitos podem ser usados de maneira eficiente para estimar a deformação da fibra inferior da camada asfáltica, e conseqüentemente prever de maneira eficiente os efeitos da fadiga, aprimorando assim os métodos de dimensionamento.

Através das pesquisas e estudos apresentados, observou-se a importância do MEF, que se trata de uma ferramenta poderosa para o aperfeiçoamento da avaliação de tensões e de deformações as quais as estruturas do pavimento estão submetidas. Verificou-se a grande capacidade do desenvolvimento e melhoria da qualidade das técnicas de dimensionamento de pavimentos, reproduzindo as diversas propriedades dos materiais. Assim, como qualquer análise, é importante a existência de uma ampla base de dados e uma simulação o mais realista possível.



### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados o método e os procedimentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Objetiva-se validar por meio do MEF, o parâmetro de dimensionamento avaliado para a previsão da fadiga da camada de revestimento de um pavimento flexível, comumente determinado em um sistema de camadas elásticas, ou seja, a deformação de tração.

Para tanto, realizou-se a análise da estrutura de um pavimento genérico, na qual, por sistema de camadas elásticas determinou-se a deformação específica de tração da fibra inferior da camada asfáltica no ponto paralelo ao centro da área na qual é aplicada a carga do pneu.

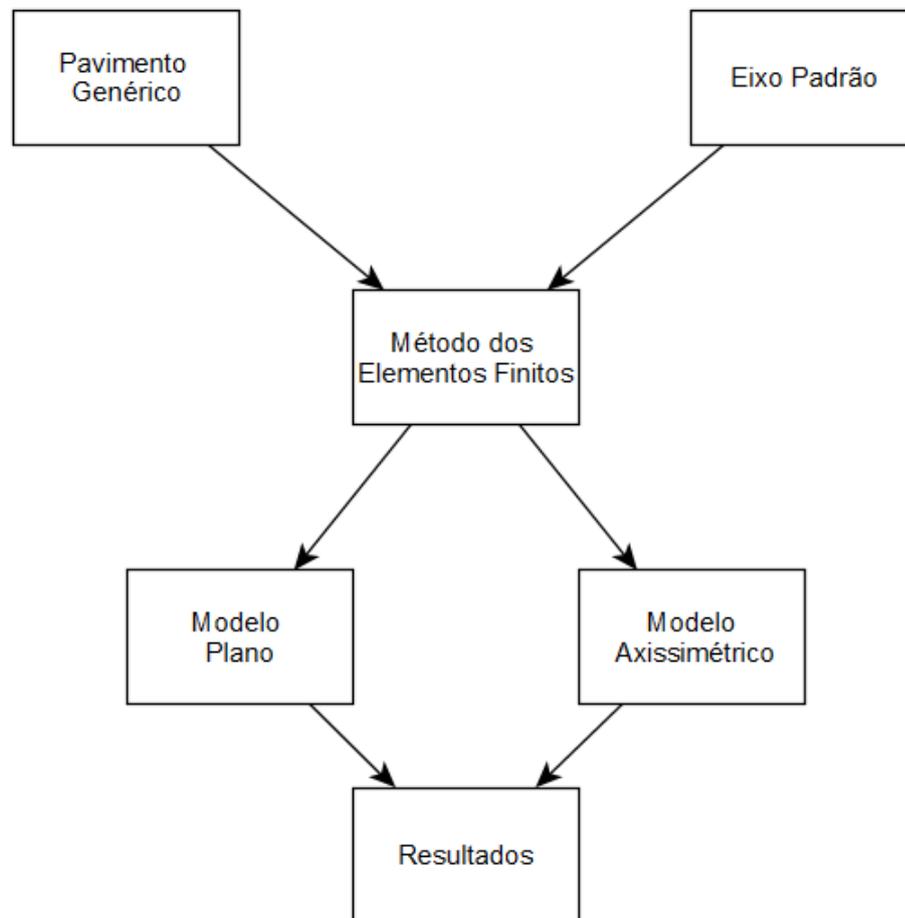
Da mesma forma, realizou-se a análise por meio do MEF, obtendo-se o parâmetro deformação.

Posteriormente, deu-se a comparação entre os resultados obtidos para o mesmo pavimento genérico. Utilizaram-se duas metodologias diferentes, sendo o sistema de camadas elásticas (análise empírico-mecanicista), para a qual a análise realizou-se com auxílio do *software* BISAR. Na segunda metodologia, utilizou-se o *software* ABAQUS na versão estudante, para a modelagem do pavimento pelo método dos elementos finitos (MEF).

Procederam-se as duas análises de forma que fosse possível a validação do modelo gerado através do método dos elementos finitos em relação à metodologia de sistema de camadas elásticas, usualmente utilizada.

#### 3.1 Considerações iniciais

Neste trabalho, abordou-se a modelagem pelo método de elementos finitos (MEF) de duas formas distintas, sendo uma análise inicial através de um modelo plano de duas dimensões e uma análise axissimétrica, também em duas dimensões. A Figura 12 ilustra o fluxograma da metodologia adotada e suas etapas são explicadas nos itens 3.2; 3.3 e 3.4.

**Figura 12 - Fluxograma da metodologia**

### 3.2 Pavimento genérico

De forma a utilizar a análise tensão/deformação em um sistema de camadas elásticas, bem como por meio de MEF, é necessário que sejam fornecidos dados de entrada aos programas. Um dos dados de entrada é a estrutura do pavimento, a espessura das camadas (revestimento, base e sub-base) e o ISC do solo de fundação (subleito).

Nesse trabalho, para realizar as análises, foi adotado como base um pavimento dimensionado por Fontes (2009), para tráfego médio ( $N = 10^7$ ), cujo dimensionamento foi realizado pelo método do DNIT/81. Ao utilizar a mesma estrutura torna-se possível comparar as deformações obtidas para os modelos desenvolvidos pelo método dos elementos finitos, e pela metodologia empírico-mecanicista. Desta forma é possível julgar a validade dos resultados dos modelos desenvolvidos no trabalho. A estrutura do pavimento genérico adotada está apresentada na Figura 13.

**Figura 13 - Pavimento genérico**

Revestimento asfáltico: 8 cm
Base em brita graduada: 15 cm
Sub-base em material granular: 20 cm
Subleito: Infinito

Fonte: Adaptado de Fontes (2009)

A camada de revestimento em mistura asfáltica adotada apresenta granulometria densa, produzida com asfalto convencional CAP 50/70 e especificada de acordo com o DNIT – ES 031 (2006), denominada de Concreto Asfáltico faixa “C”. Esta especificação de mistura asfáltica é a mais utilizada no Brasil, especialmente em Santa Catarina.

Os demais dados de entrada dos programas são: o módulo de rigidez e o coeficiente de Poisson de cada camada. As propriedades da camada de revestimento, bem como das demais camadas do pavimento genérico, foram adotadas conforme Fontes (2009) e estão apresentadas na Tabela 1. Para o revestimento o módulo foi determinado por meio de ensaios em flexão alternada em quatro pontos. Para as demais camadas, foram utilizados os parâmetros constantes no Projeto de Duplicação da Rodovia BR-101/SC, trecho sul, adotados por Fontes (2009).

**Tabela 1 - Propriedades das camadas do pavimento genérico**

Camada	Módulo (MPa)	Coefficiente de Poisson
Revestimento asfáltico	6314	0,35
Base	400	0,4
Sub-base	200	0,4
Subleito	100	0,45

Fonte: Adaptado de Fontes (2009)

Fontes (2009) determinou a lei de fadiga da mistura asfáltica por meio do ensaio de flexão alternada em quatro pontos. O ensaio foi realizado em deformação controlada, na temperatura de 20°C e frequência de 10 Hz. A Equação 2 apresenta a

lei encontrada que relaciona o número de ciclos necessários para uma redução de 50% na rigidez inicial da mistura (N) com a deformação de tração ( $\epsilon_t$ ). Por meio da lei de fadiga (Equação 2), a deformação e tração na fibra inferior da camada betuminosa ( $\epsilon_t$ ), é possível relacionar a vida útil da estrutura, em termos de fadiga, com o número de repetições admissíveis, ou seja, com o número N (número de eixos equivalente ao eixo padrão de 8,2 tf) para o período de projeto de 10 anos.

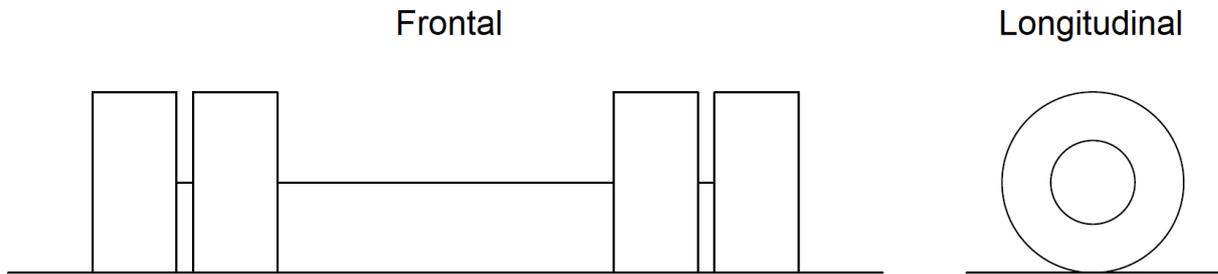
$$N = 1,185 \cdot 10^{15} \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{4,037} \quad (2)$$

### 3.3 Eixo Padrão

De modo a realizar-se o cálculo da capacidade de suporte dos pavimentos rodoviários, faz-se o uso de uma unidade padrão, o Eixo Padrão Rodoviário. Este eixo é utilizado como base para a realização do dimensionamento de pavimentos. Toda a diversidade de eixos e cargas existentes atualmente e que circulam pelas rodovias brasileiras, têm seus efeitos representados por equivalências ao eixo padrão.

O eixo padrão corresponde então, a um eixo simples de rodas duplas, que possui a carga de 8,2 tf, simplificadas para 80 KN, e possui uma área de contato pneu pavimento considerada circular e de raio 10,8 cm.

No entanto, nesse trabalho, o Eixo Simples Padrão (ESP) foi simplificado, ou seja, definiu-se um carregamento equivalente para entrada nos modelos planos e axissimétrico, o eixo padrão equivalente. Isto se deve às limitações existentes nos modelos adotados, incapazes de representar as duas áreas de distribuição de carga das rodas duplas. O modelo axissimétrico é restrito à representação de uma única carga circular e o corte realizado para o modelo plano, que considera o sentido longitudinal da estrutura do pavimento, ocultaria uma segunda carga, como pode ser observado na Figura 14.

**Figura 14** – Vistas do eixo padrão

O eixo padrão equivalente foi definido através de um procedimento iterativo utilizando o *software* BISAR. Buscou-se um raio para a área de contato pneu pavimento que distribuísse a carga das duas rodas, em apenas uma, a partir da premissa de que as deformações de tração da fibra inferior do revestimento asfáltico, fossem equivalentes (iguais ou semelhantes) àsquelas do ESP (eixo duplo, roda simples). Desta forma, assegurou-se que, embora a carga esteja sendo aplicada em apenas uma área de contato ao invés de duas, as deformações entre os dois tipos de eixo (padrão e equivalente), sejam equivalentes, o que implica em resultados para os modelos condizentes com o eixo padrão.

### 3.4 Modelagem pelo Método dos Elementos Finitos

A modelagem pelo método dos elementos finitos do pavimento genérico foi realizada através de dois modelos, um modelo plano em duas dimensões, e um modelo axissimétrico de simetria radial. Em ambos os modelos os materiais foram considerados homogêneos, isotrópicos e elástico-lineares.

Ambos os modelos tiveram suas dimensões limitadas no sentido horizontal, e vertical em razões do raio definido para o eixo padrão genérico. Para o modelo axissimétrico apenas uma razão será experimentada. Por outro lado, para o modelo plano, será testado um modelo com as mesmas dimensões do axissimétrico, sendo, um com o dobro da dimensão horizontal, e o outro com o dobro nas duas dimensões, de modo a se observar esta implicação ao resultado.

### 3.4.1 ABAQUS versão estudante

Para modelagem dos sistemas foi utilizado um *software* de elementos finitos, desenvolvido pela empresa 3DS *Academy*, ABAQUS. Trata-se de uma ferramenta computacional para análises por meio de elementos finitos, o qual apresenta ferramentas necessárias para a elaboração de modelos compostos por este método de modo que os cálculos como tensões, deformações, deslocamentos, entre outros, possam ser realizados. Contudo, para modelagem da malha, a versão estudante é restrita a apenas 1000 nós. Assim, tendo em conta a complexidade exigida de uma estrutura de pavimento foi possível a modelagem apenas de modelos em 2 dimensões (2D). A modelagem ideal para esta situação seria em 3D, a qual, para tensão, deformação e deslocamento exige uma maior quantidade de elementos de malha.

### 3.4.2 Modelagem Plana 2D

O modelo plano 2D foi concebido através de um corte no pavimento genérico no sentido longitudinal ao deslocamento das cargas, correspondendo a apenas uma roda, como pode ser observado na Figura 15. Optou-se por esta representação pois a deformação das fibras inferiores do pavimento utilizada na lei de fadiga de um pavimento, se trata da deformação paralela à direção na qual a roda se movimenta. Considerando uma análise que representasse o eixo padrão, a parte da carga referente a apenas uma das rodas poderia ser representada no modelo. Desta forma, como o modelo representa apenas uma carga distribuída no centro da superfície utilizou-se o procedimento definido na metodologia (Item 3.3), para definir um eixo padrão equivalente. O raio determinado para este eixo foi utilizado para dimensionar o comprimento no qual foi distribuída a carga nos modelos planos correspondente à 2 vezes este valor.

**Figura 15 - Corte Longitudinal utilizado no modelo plano**



A espessura (profundidade) das camadas corresponde ao pavimento genérico apresentado na Figura 13 é composto por: revestimento em concreto asfáltico com 8 cm de espessura, base em brita graduada com espessura de 15 cm, sub-base em material granular com espessura de 15 cm. Com relação ao subleito, sua dimensão foi apresentada com espessura bem superior às demais camadas, podendo assim, no modelo, ser considerada de espessura infinita em relação às demais camadas. As dimensões horizontais do modelo foram consideradas finitas.

### 3.4.3 Modelagem Axissimétrica 2D

O modelo axissimétrico é uma aproximação à representação 3D e utiliza de coordenadas cilíndricas para representar o modelo desejado em 2D. Essa representação pode ser adotada quando existir simetria caracterizada por um eixo de revolução, e a partir do qual são determinadas às coordenadas cilíndricas. Como o modelo deve ser simétrico em relação a este eixo, não é possível considerar mais de uma carga circular distribuída. Assim, para o uso do modelo axissimétrico, o eixo simples de roda dupla foi convertido em um eixo simples de roda única, como descrito no Item 3.3.

Considerou-se assim, na modelagem, a existência de simetria por todo plano, em relação ao centro de aplicação da carga do pneu, por meio de um corte a partir deste ponto, até a extremidade do pavimento. Desta forma, a carga deste modelo foi representada de forma distribuída por um comprimento equivalente a 1 vez o raio do eixo padrão equivalente (item 3.3), com localização na extremidade da malha.

#### 3.4.4 Processo de realização da modelagem

O processo da modelagem do sistema de pavimento através do programa ABAQUS foi composto pelas seguintes etapas:

1. Definição das propriedades materiais;
2. Modelagem da geometria da estrutura;
3. Definição das seções;
4. Delimitação das camadas do pavimento;
5. Atribuição das seções às camadas do pavimento;
6. Criação da malha;
7. Imposição das restrições de movimento;
8. Imposição do carregamento;
9. Etapa de cálculo.

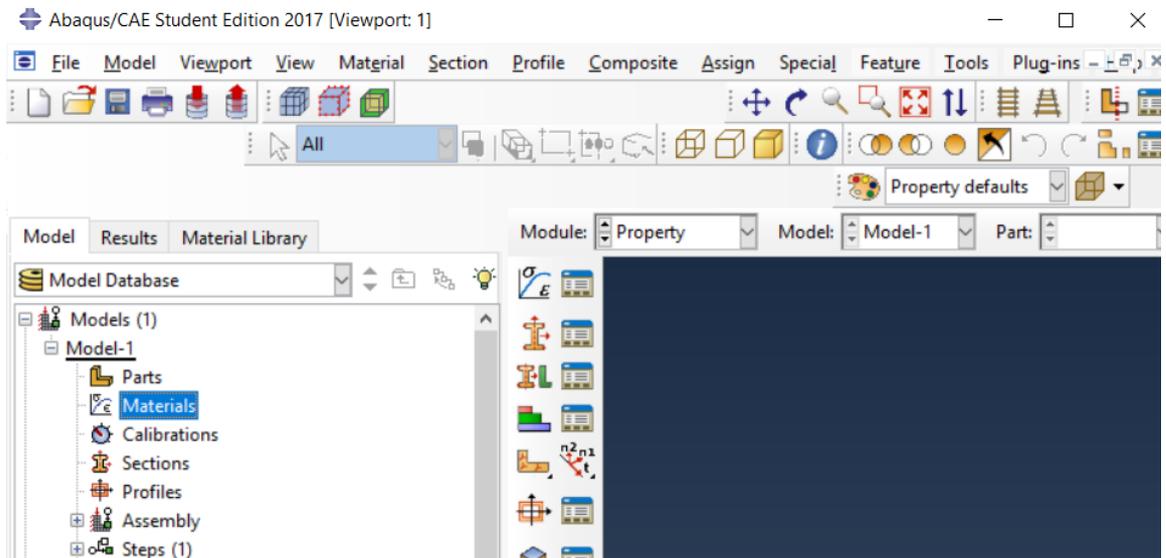
As etapas de 1 a 9 foram adotadas no presente trabalho e serão brevemente descritas. Destaca-se que para a criação do modelo passos distintos dos apresentados podem ser utilizados. Estas etapas servem apenas como um guia de modelagem a ser utilizado para a reprodução do conteúdo do presente trabalho.

##### **Etapa 1**

Para realização da modelagem é necessário a definição das propriedades dos materiais utilizados, as quais foram apresentadas na Tabela 1. Seguem-se as seguintes fases explicadas e ilustradas por meio de figuras.

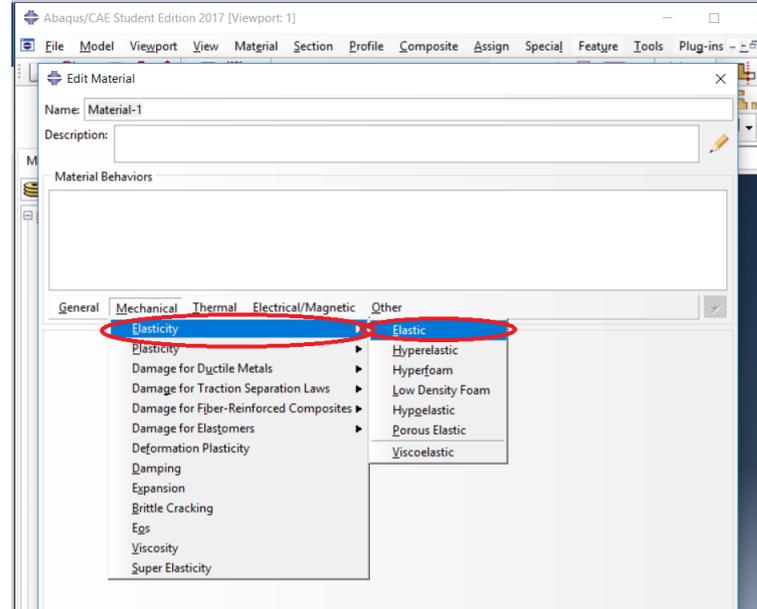
Fase 1 – No programa de MEF, as propriedades dos materiais são introduzidas, selecionando-se a aba materiais (*materials*) como ilustrado na Figura 16.

**Figura 16 - Propriedades dos materiais – fase 1.**



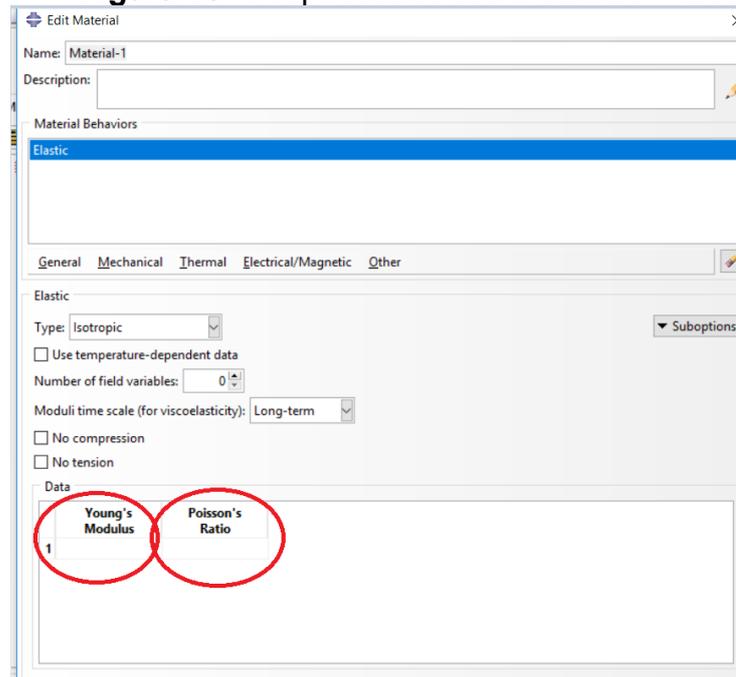
Fase 2 – Na aba de propriedades busca-se as propriedades mecânicas de elasticidade, e define-se o comportamento do material como elástico (Figura 17).

**Figura 17 - Propriedades dos materiais – fase 2**



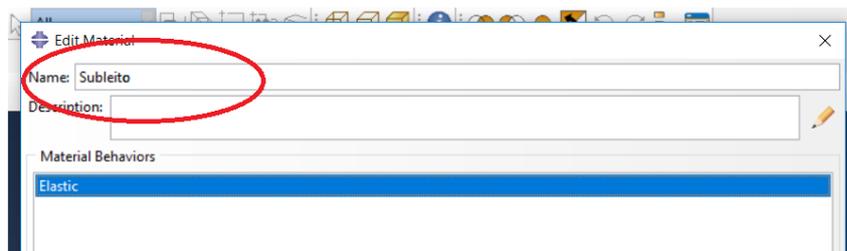
Fase 3 – O padrão do programa considera o comportamento dos materiais como isotrópico, de modo que nesta fase se insere os valores dos módulos e dos coeficientes de Poisson das camadas constituintes do pavimento na região destacada na Figura 18.

**Figura 18 - Propriedades dos materiais – fase 3**



Fase 4 – Após a inserção dos dados deve-se nomear o material de cada camada, como no exemplo apresentado na Figura 19. Assim, está finalizada esta etapa.

**Figura 19 - Propriedades dos materiais – fase 4.**

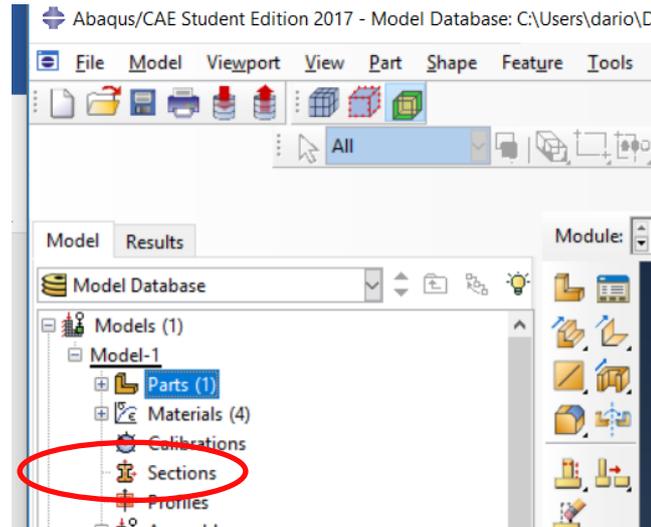


## Etapa 2

Após definidas as propriedades dos materiais deverá ser criada a geometria (*part*) que irá representar o modelo. Para tanto, são necessárias 4 fases.

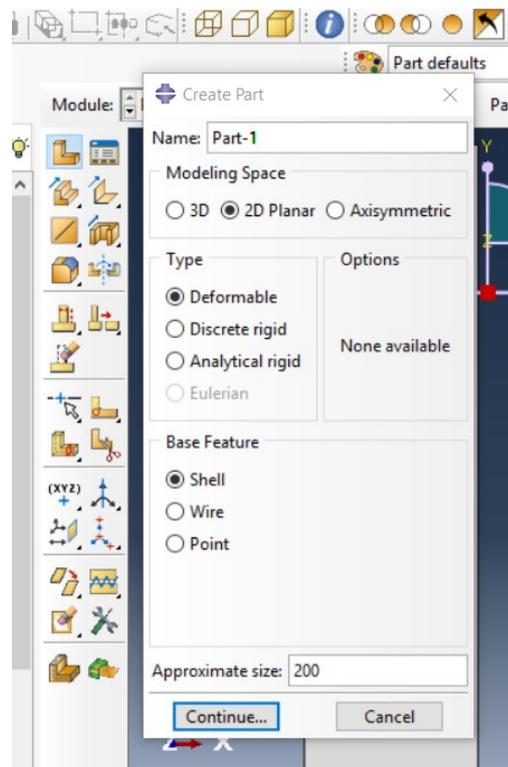
Fase 1 – Seleciona-se a opção *Parts*, existente no *menu* dos modelos (Figura 20).

**Figura 20 - Modelagem da geometria - fase 1.**



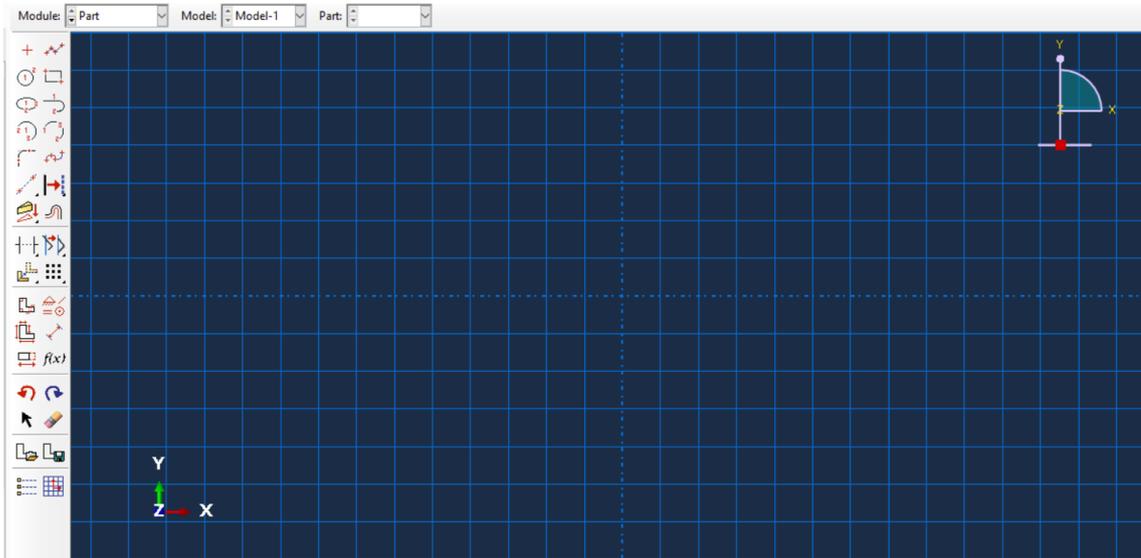
Fase 2 – Ao selecionar-se esta opção irá aparecer o *menu* de criação de partes, no qual há a opção de modelar sistemas 3D, 2D plano ou 2D Axissimétrico. Seleciona-se o tipo de modelagem desejado e mantém-se o restante das opções como o padrão já definido pelo programa (Figura 21).

**Figura 21 - Modelagem da geometria – fase 2.**



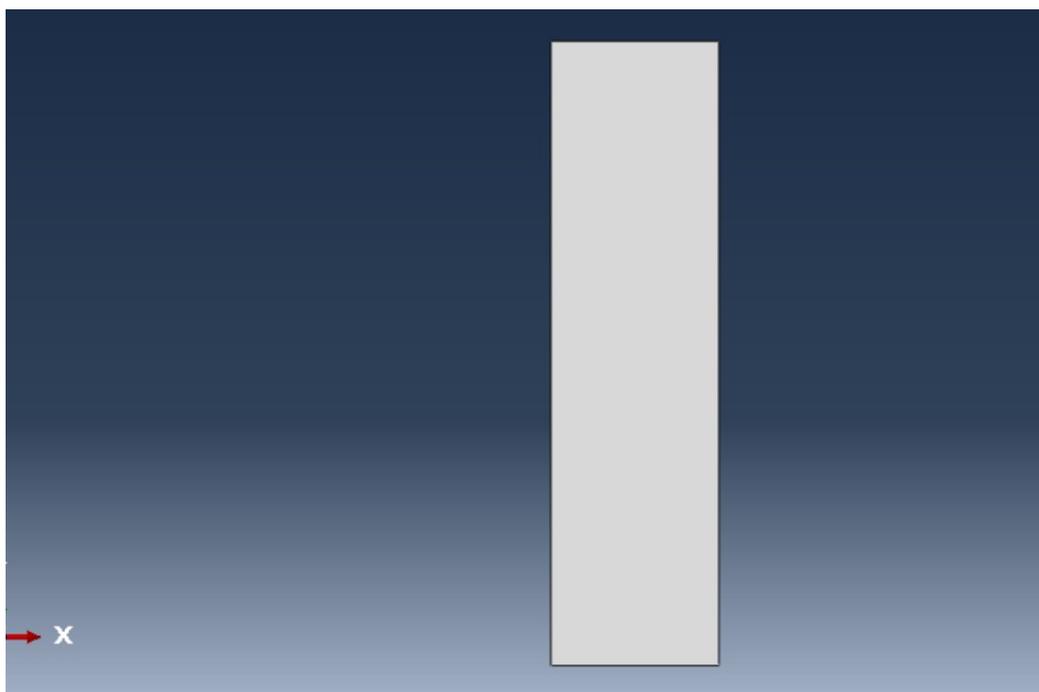
Fase 3 – A fase 2 concluída, o programa mostra o modo desenho, como pode ser observado na Figura 22.

**Figura 22 - Modelagem da geometria – fase 3.**



Fase 4 – Define-se a geometria desejada para o modelo, utilizando-se das ferramentas de desenho disponíveis, que correspondem a ferramentas de entrada por pontos, linhas, arcos, entre outras, a Figura 23 apresenta o exemplo de uma forma após ser desenhada.

**Figura 23 - Modelagem da geometria – fase 4.**

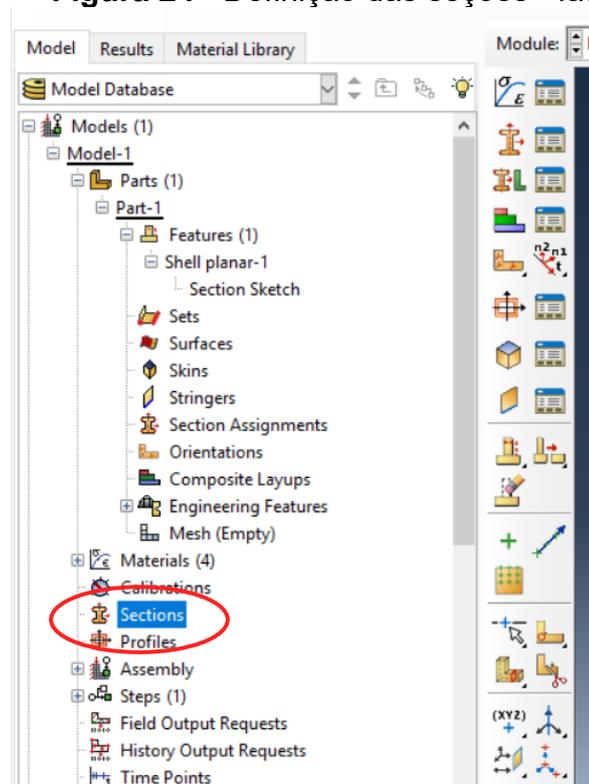


### Etapa 3

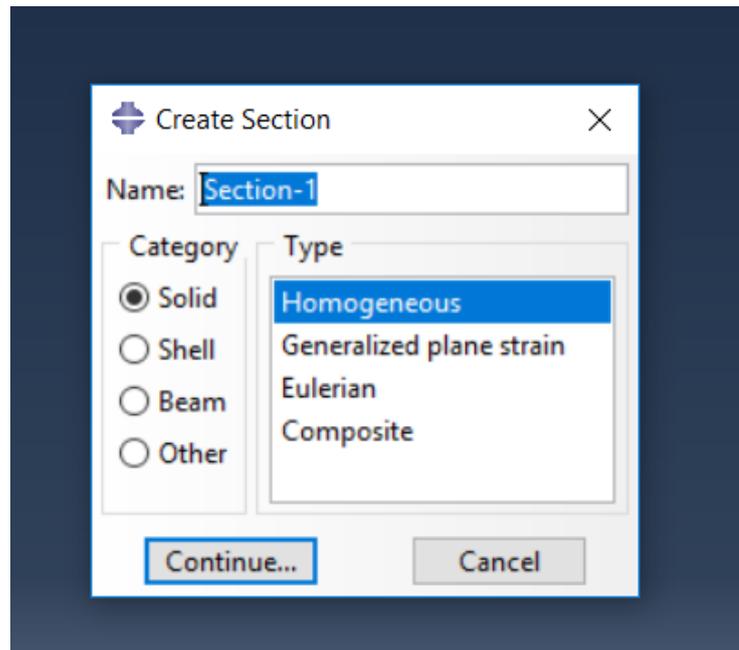
Após definida a geometria do sistema, a etapa seguinte é de criação das seções que são realizadas em três fases.

Fase 1 – Nesta fase as seções são definidas, onde será dividida a geometria anteriormente criada, ou seja, as seções que irão representar a atribuição das propriedades de cada diferente camada do pavimento. Seleciona-se então a opção de seções (*Sections*), destacada na Figura 24.

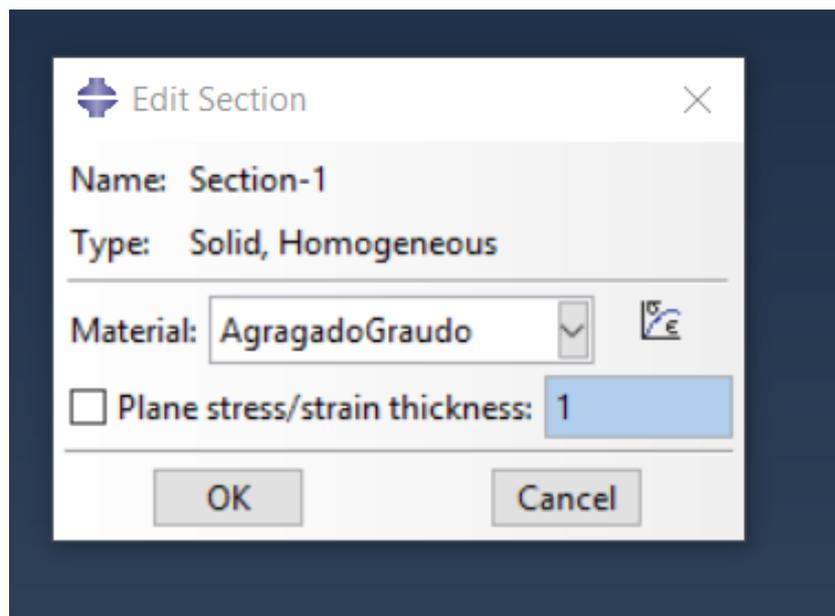
**Figura 24 - Definição das seções - fase 1.**



Fase 2 – Como demonstrado na Figura 25, será aberto um *menu* no qual será definido que a seção irá corresponder a um sólido homogêneo.

**Figura 25** - Definição das seções – fase 2.

Fase 3 – Após escolhido tipo de seção, será necessário selecionar qual dos materiais estabelecidos na Etapa 1 será atribuído à seção que está sendo criada, como pode ser observado pelo exemplo da Figura 26, no qual o material “AgregadoGraudo” é atribuído a seção de nome “Section-1”.

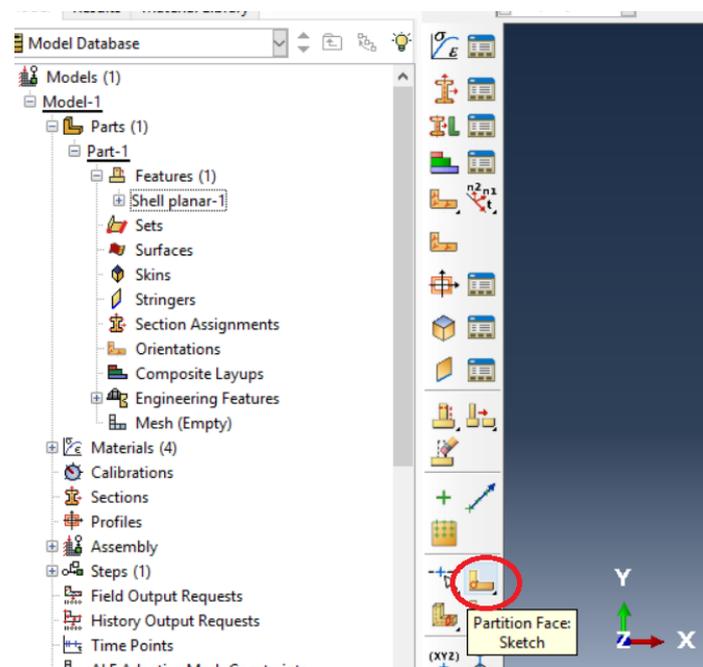
**Figura 26** - Definição das seções – fase 3.

#### Etapa 4

Cada camada do pavimento apresenta determinada espessura e material e nesta etapa são requeridas duas fases.

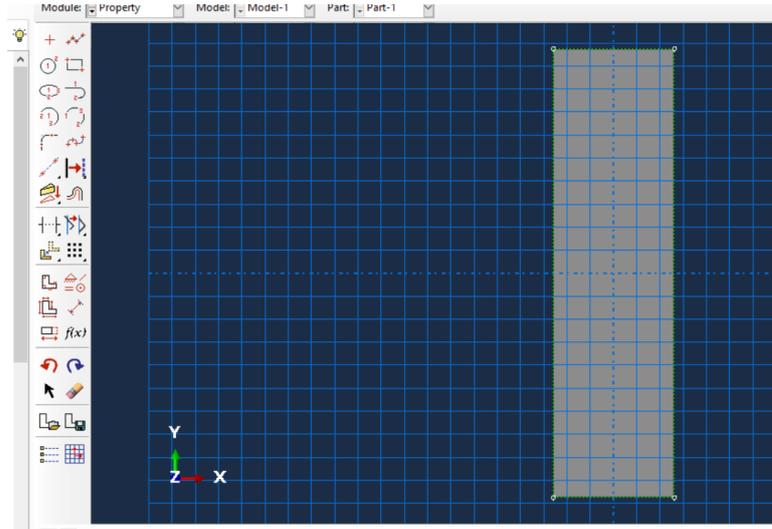
Fase 1 – Tendo-se criado cada uma das seções é necessário então “cortar” o sólido definido pela parte que cabe a cada camada. Assim, defini-se a área referente a cada camada do pavimento genérico e seleciona-se a ferramenta que realiza o corte do sólido (*Partition Face: Sketch*), destacada na Figura 27.

**Figura 27 -** Definição das camadas do pavimento – fase 1.

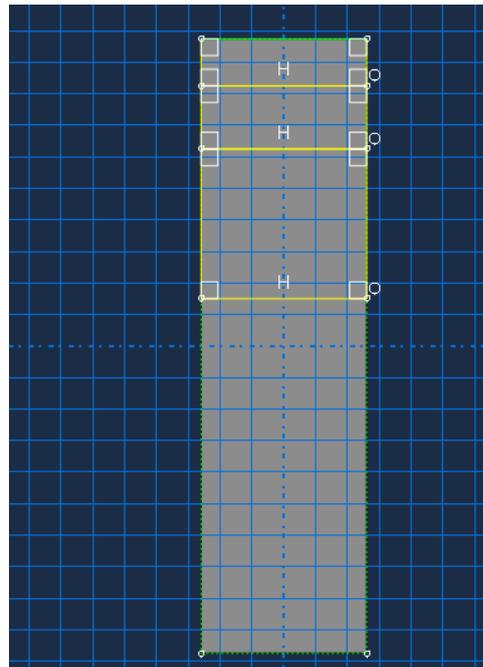


Fase 2 – Utilizando-se das ferramentas de desenho delimitam-se cada uma das camadas do pavimento desejado, de acordo com o que foi previamente definido. A Figura 28 e a Figura 29 mostram a geometria antes e depois destas camadas serem delimitadas. Ressalta-se que essas partições do sólido geram geometrias complementares, que são necessárias para a entrada de dados, condições de contorno, ou até mesmo para o refinamento da malha. Desta forma, caso pretenda-se aplicar uma carga distribuída posteriormente, sua região deve ser delimitada desta etapa.

**Figura 28** - Definição das camadas do pavimento – fase 2



**Figura 29** - Definição das camadas do pavimento – fase 2.

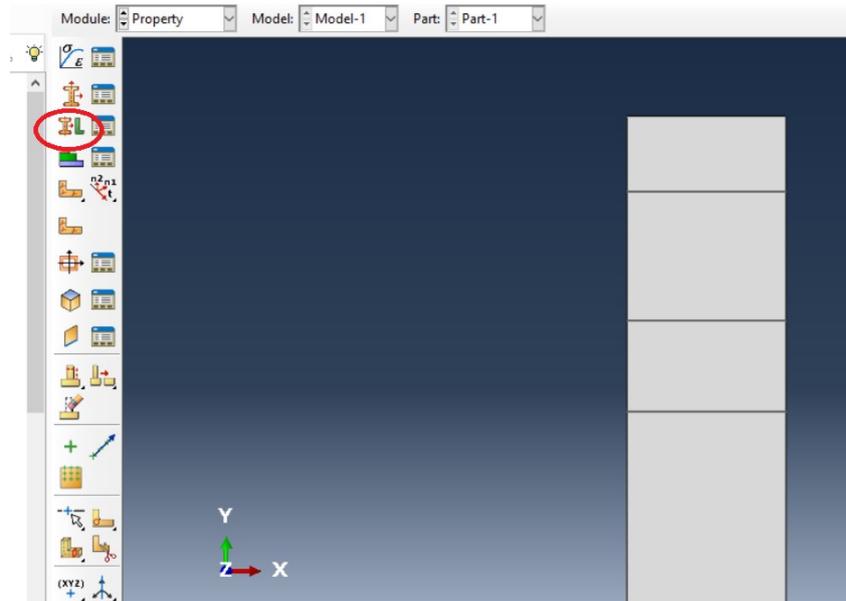


### **Etapas 5**

Após definir as dimensões camadas, é necessário atribuir a elas as seções que foram definidas anteriormente, representativas do material que compõe cada camada.

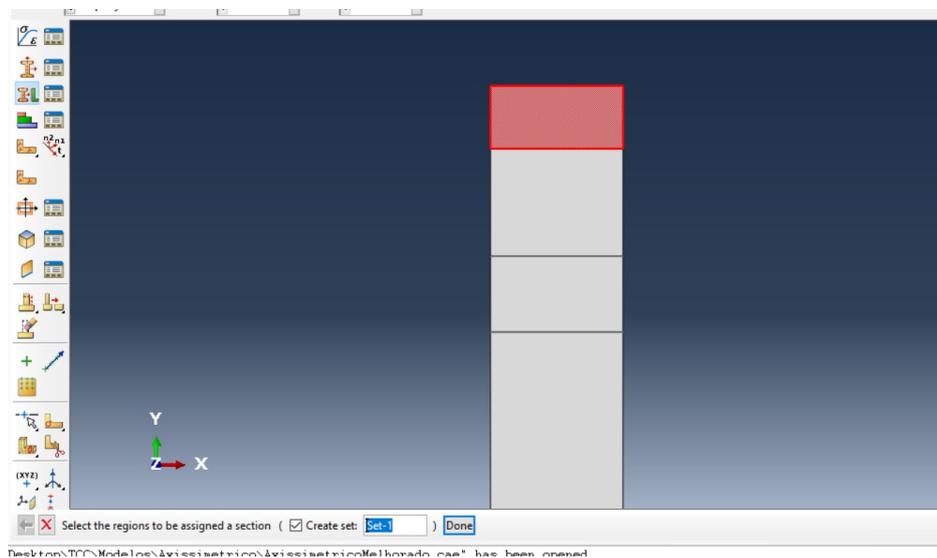
Fase 1 – Seleciona-se então a ferramenta destacada na Figura 30, *Assign Section*, para atribuir a seção à área desejada.

**Figura 30 - Atribuição das seções – fase 1.**

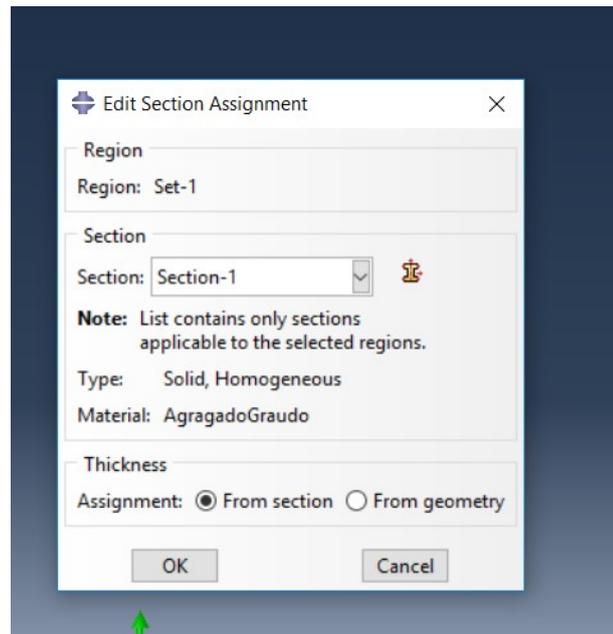


Fase 2 – A área a qual se deseja atribuir a seção deve ser então selecionada, clicando-se sobre ela, ela irá ficar destacada, como mostra a Figura 31.

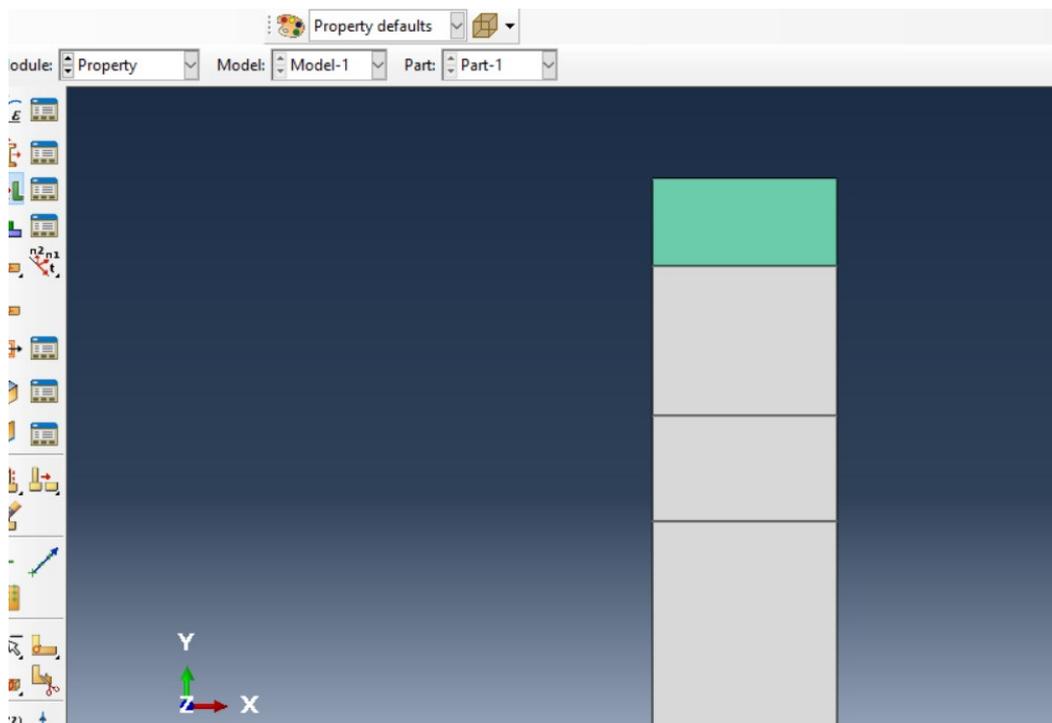
**Figura 31 - Atribuição das seções – fase 2.**



Fase 3 – Posteriormente, seleciona-se a seção que representa o material que se deseja atribuir à camada selecionada (Figura 32).

**Figura 32 - Atribuição das seções – fase 3**

Fase 4 – Após atribuir a seção a uma camada, esta muda de cor como pode ser observado na Figura 33, indicando que esta camada possui uma seção atribuída a ela.

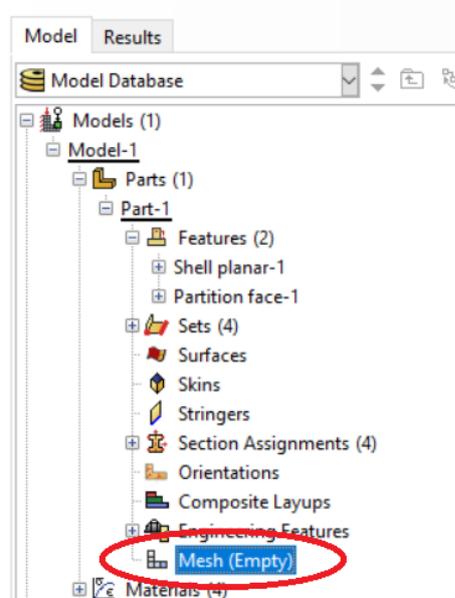
**Figura 33 - Atribuição das seções – fase 4.**

## Etapa 6

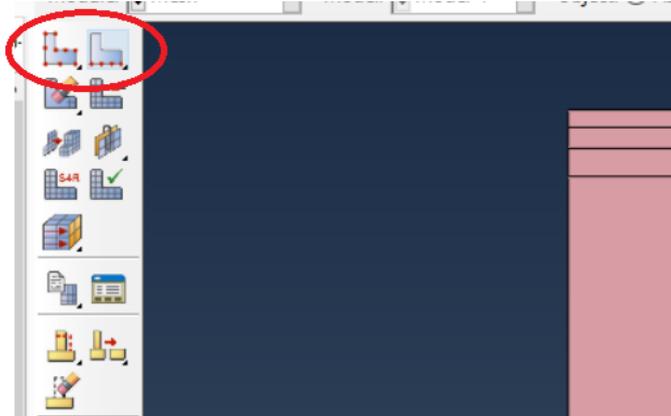
Após serem atribuídas às seções a todas as áreas componentes do modelo, será necessário criar a malha que irá delimitar os elementos finitos do modelo.

Fase 1 – Após um duplo clique na opção de malha (*mesh*) irá abrir o *menu* para o trabalho com a malha (Figura 34).

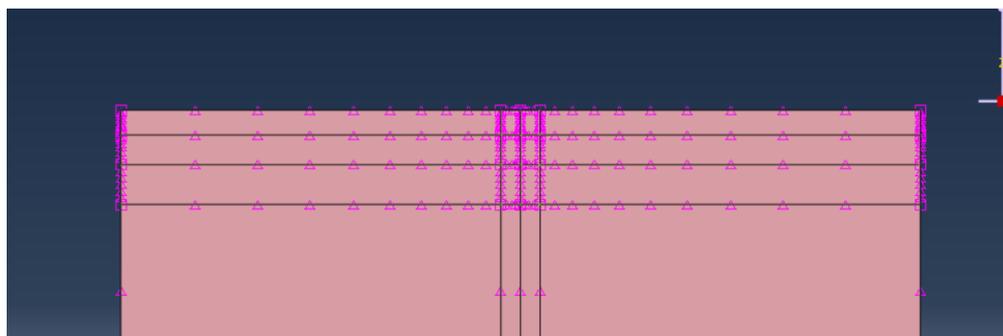
**Figura 34** - Criação da malha – fase 1.



Fase 2 – Após, seleciona-se uma das duas ferramentas para a delimitação dos pontos onde a malha será definida, *seed parts* ou *seed edges*, destacadas na Figura 35. A primeira realiza a distribuição dos nós por toda a geometria, baseando-se no tamanho desejado para os elementos. A segunda, realiza a distribuição dos nós de cada borda individualmente, podendo ser definida tanto pelo tamanho desejado para o elemento naquela borda, quanto o número de elementos que se deseja nesta borda.

**Figura 35 - Criação da malha – fase 2.**

Fase 3 – Recomenda-se que estes pontos sejam definidos da forma que haja uma maior concentração de elementos mais próximos aos pontos de interesse na malha. A Figura 36 apresenta um exemplo de aplicação desta recomendação, onde os triângulos rosa indicam os pontos onde os nós serão criados, e que encontram-se concentrados na porção central do modelo. Isso pode ser realizado utilizando-se a ferramenta *seed edges*, que também pode definir uma direção para a concentração dos nós através de uma linha de tendência, na qual os nós diminuem sua distância entre si em uma proporção escolhida.

**Figura 36 - Criação da malha – fase 3.**

Fase 4 – Após definidos estes pontos, seleciona-se a ferramenta para criar a malha, *Mesh Part*, destacada na Figura 37.

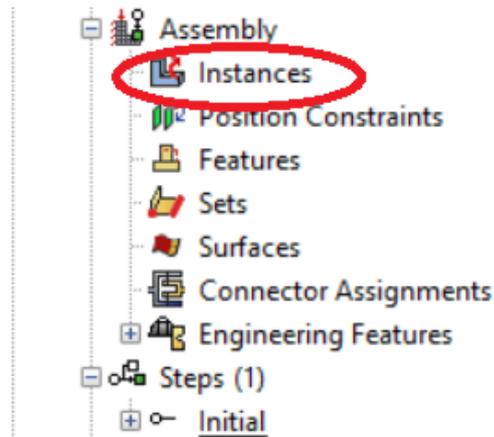


## Etapa 7

Esta etapa trata da imposição das restrições de movimento do modelo.

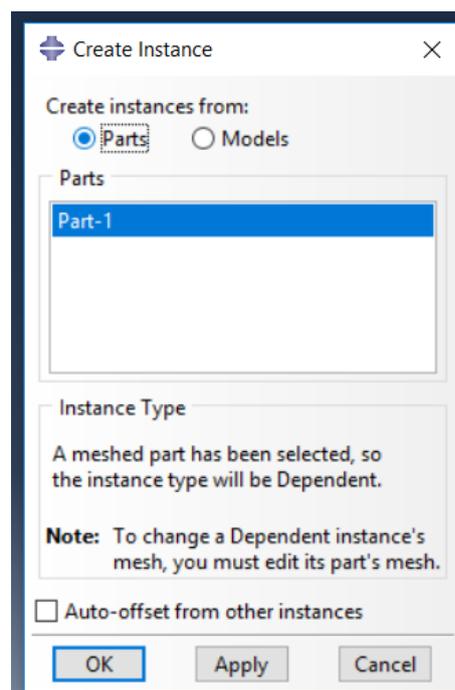
Fase 1 – Após definir a malha é necessário juntar as diferentes partes constituintes de um modelo. Para isto, seleciona-se a ferramenta *instances*, destacada na Figura 39.

**Figura 39** - Imposição das restrições – fase 1.



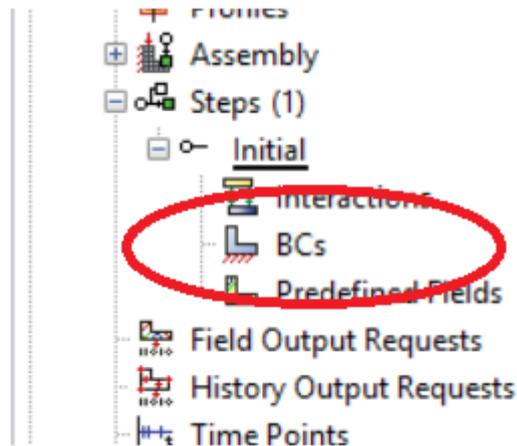
Fase 2 – Nesta ferramenta selecionam-se as diferentes partes que foram desenvolvidas, que no caso dos modelos desenvolvidos nesse estudo correspondem a uma única parte como pode ser observado na Figura 40.

**Figura 40** - Imposição das restrições – fase 2.



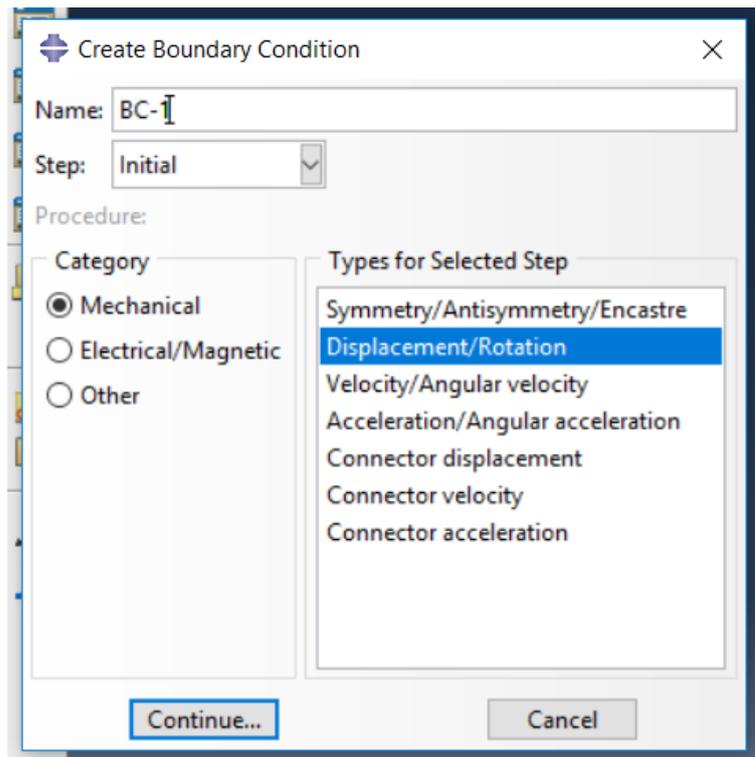
Fase 3 – Após, na etapa inicial de cálculo (*steps* → *initial*), são aplicadas as restrições de movimento do modelo. Para restrições de movimento deve ser selecionada a opção das restrições, *Boundary Conditions* (BCs) (Figura 41).

**Figura 41** - Imposição das restrições – fase 3.



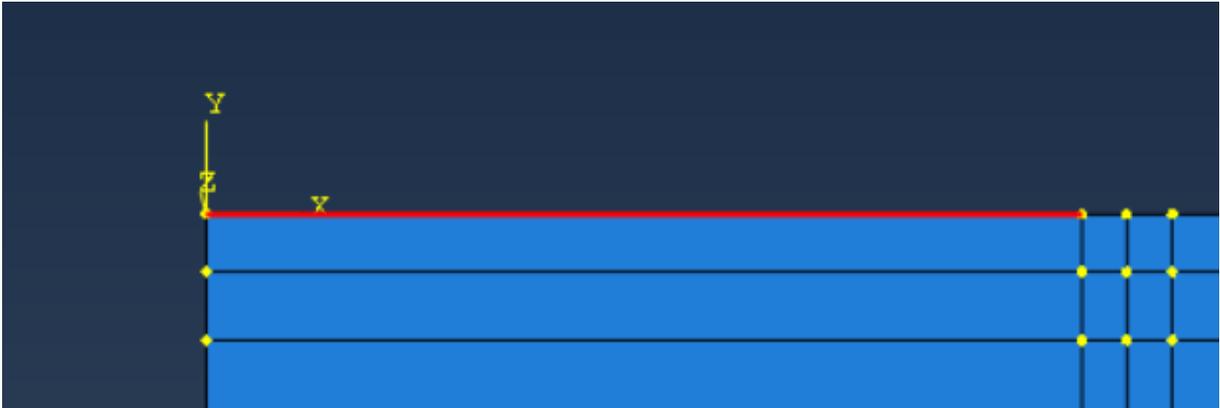
Fase 4 – A seguir, um *menu* será aberto, no qual será definida qual o tipo de restrição desejada ao modelo, neste caso será a opção *displacement/rotation* (Figura 42).

**Figura 42** - Imposição das restrições – fase 4.



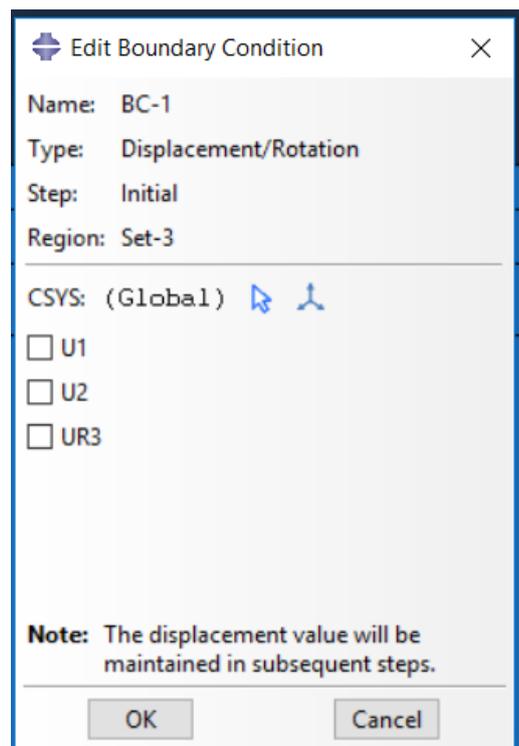
Fase 5 – Depois de selecionada a restrição desejada e necessária ao modelo, deve-se definir a área a qual ela será atribuída. A área selecionada fica destacada em vermelho como pode ser observado na Figura 43.

**Figura 43** - Imposição das restrições – fase 5.



Fase 6 – Seleciona-se então as restrições de deslocamento no eixo x, y ou rotação que serão atribuídos ao modelo, através do *menu* apresentado na Figura 44. Para os modelos deste trabalho restringiu-se o deslocamento horizontal (U1) nas extremidades laterais e inferior, bem como ao deslocamento vertical (U2) apenas na extremidade inferior.

**Figura 44** - Imposição das restrições – fase 6.



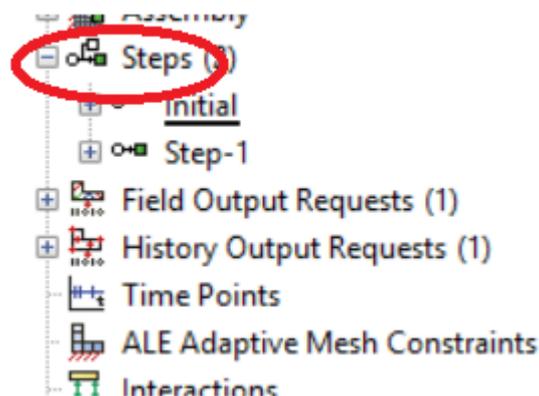
Ressalta-se que na etapa inicial de cálculo (*steps* → *initial*), que é a responsável pela definição das condições iniciais do modelo, também são definidas as tensões iniciais nele aplicadas. No presente trabalho estas tensões foram consideradas nulas.

### Etapa 8

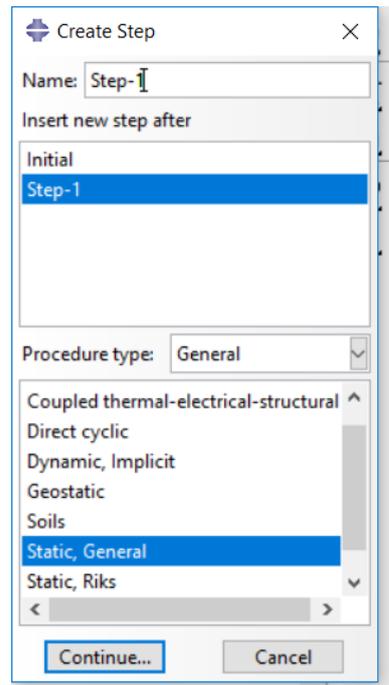
Nesta etapa é realizada a imposição do carregamento.

Fase 1 – Após definidas as restrições de movimento, é feita a criação de uma nova etapa de cálculo, na qual será atribuída a carga agindo sobre o sistema. Realiza-se um duplo clique na opção de etapas (*steps*), para abrir o *menu* de criação de uma nova etapa (Figura 45).

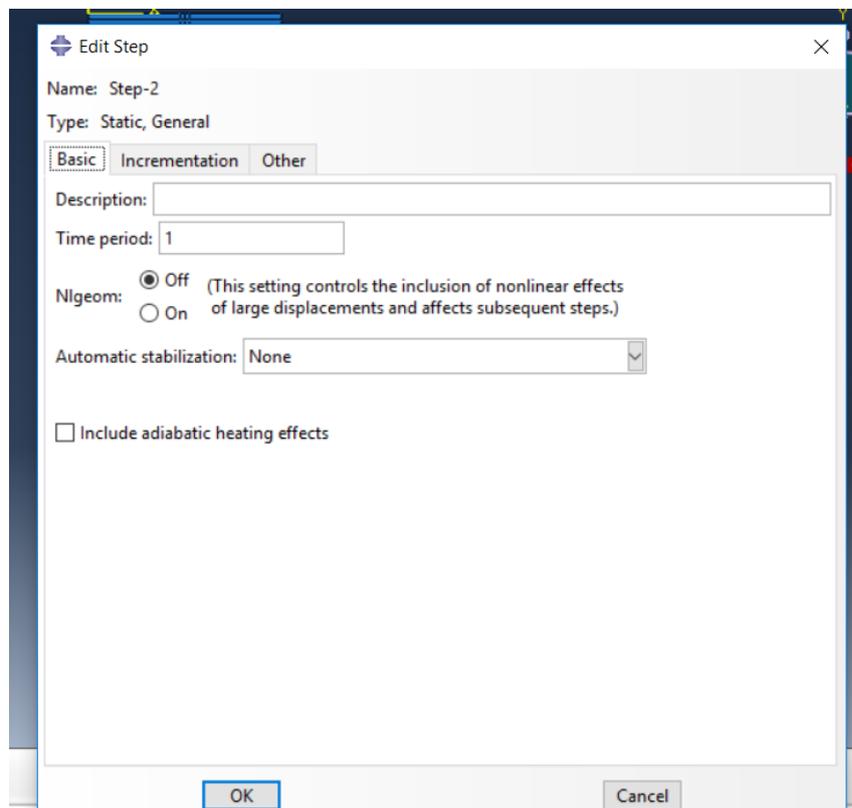
**Figura 45** - Imposição do carregamento – fase 1.



Fase 2 – Cria-se uma nova etapa além da inicial, com o modelo de cálculo geral estático (*static/General*), assim como o apresentado na Figura 46.

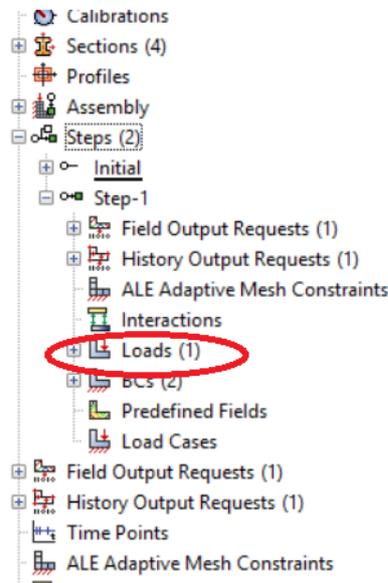
**Figura 46** - Imposição do carregamento – fase 2.

Fase 3 – Mantem-se as opções do *menu* apresentado na Figura 47, sem alterações mantendo-se o padrão do programa.

**Figura 47** - Imposição do carregamento – fase 3.

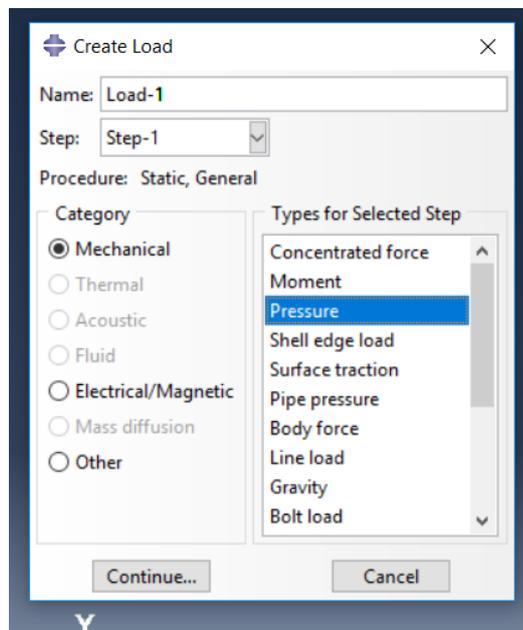
Fase 4 – Nesta nova etapa de cálculo deverá ser selecionada a opção de cargas (*loads*), destacada na Figura 48.

**Figura 48** - Imposição do carregamento – fase 4.



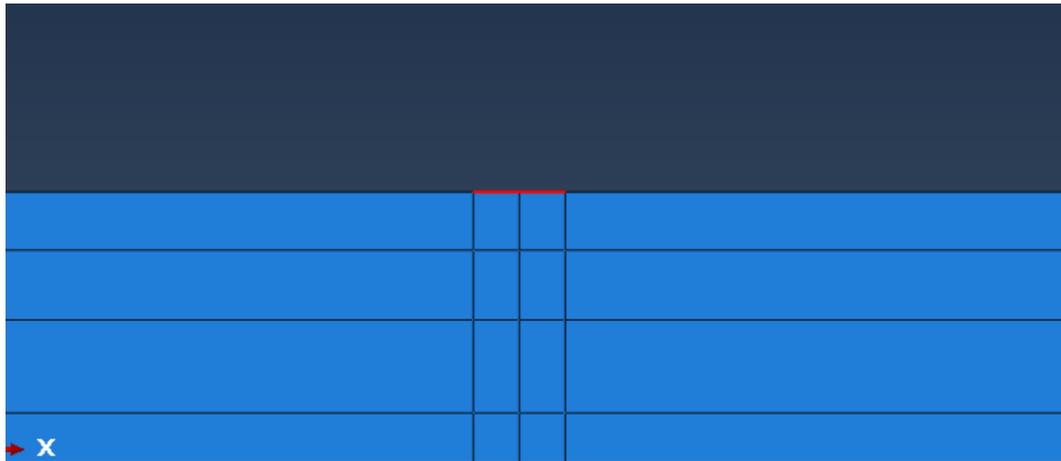
Fase 5 – No *menu* de nova carga, deve ser selecionado que tipo de carga será aplicada ao sistema. Para a modelagem realizada neste trabalho, foi selecionada pressão (*pressure*) (Figura 49). Isto porque a área do pneu, admitida como circular, produz uma área de contato na interface pneu/pavimento, na qual a carga exercida é uma pressão.

**Figura 49** - Imposição do carregamento – fase 5.



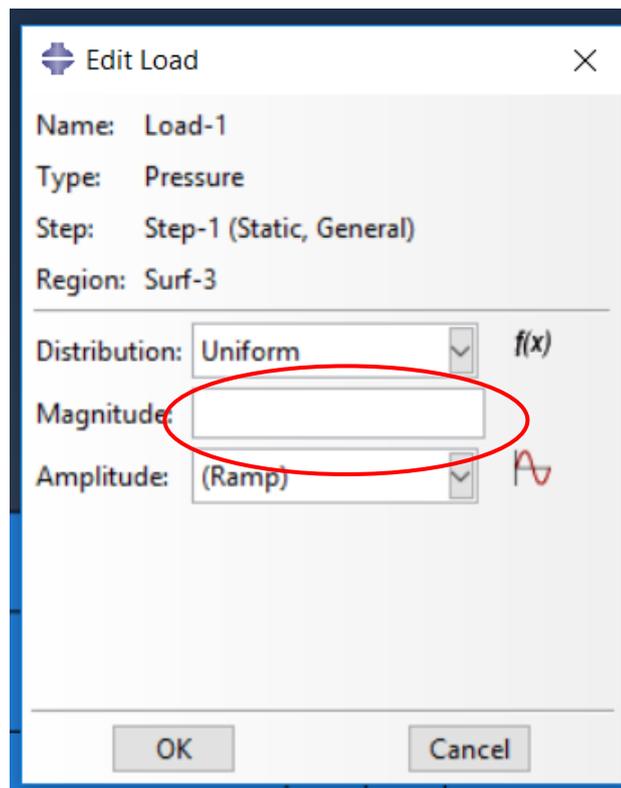
Fase 6 – Definido o tipo de carga, deve ser selecionada a superfície na qual ela será aplicada. A superfície deve ser aquela definida juntamente à etapa onde foram introduzidas no modelo as camadas do pavimento, a superfície selecionada para aplicação da carga fica vermelha como apresentado na Figura 50.

**Figura 50** - Imposição do carregamento – fase 6.



Fase 7 – Após definida a superfície, o programa mostra o *menu* no qual a intensidade do carregamento deve ser atribuída (Figura 51).

**Figura 51** - Imposição do carregamento – fase 7

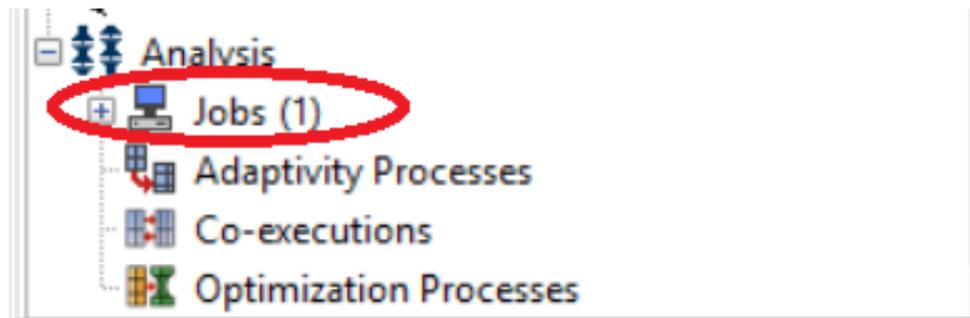


## Etapa 9

Esta é a etapa de cálculo do modelo.

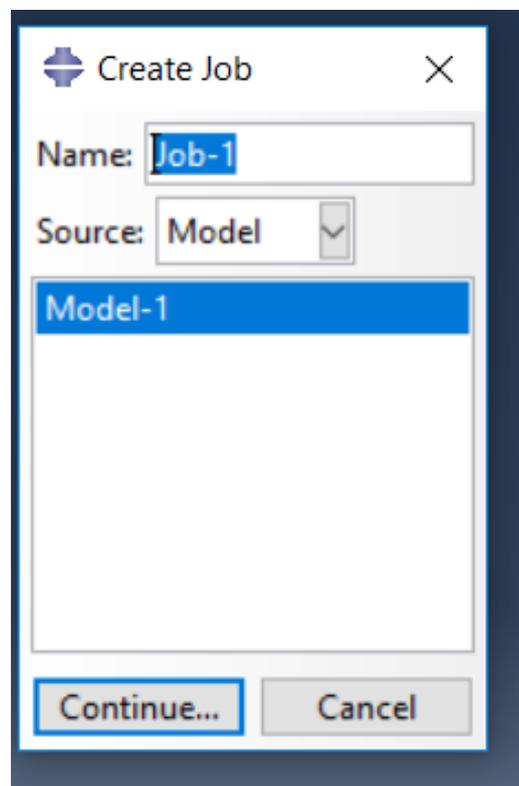
Fase 1 – Seleciona-se o *menu* de trabalho (jobs), destacado na Figura 52.

**Figura 52** - Etapa de Cálculo – fase 1.



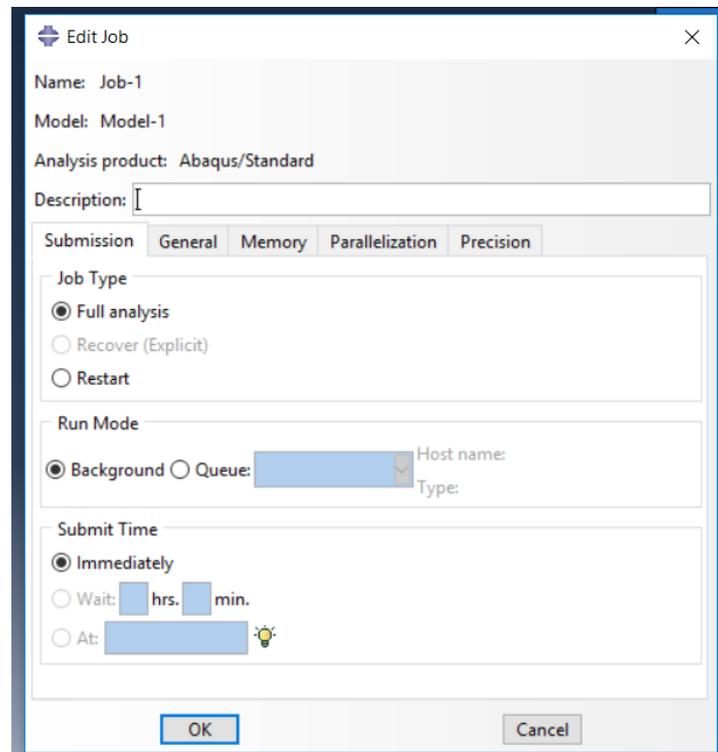
Fase 2 – Assim, será aberta a opção para a criação de um novo trabalho de cálculo assim como o representado na Figura 53, nele confirma-se a seleção do modelo que será analisado.

**Figura 53** - Etapa de Cálculo – fase 2.



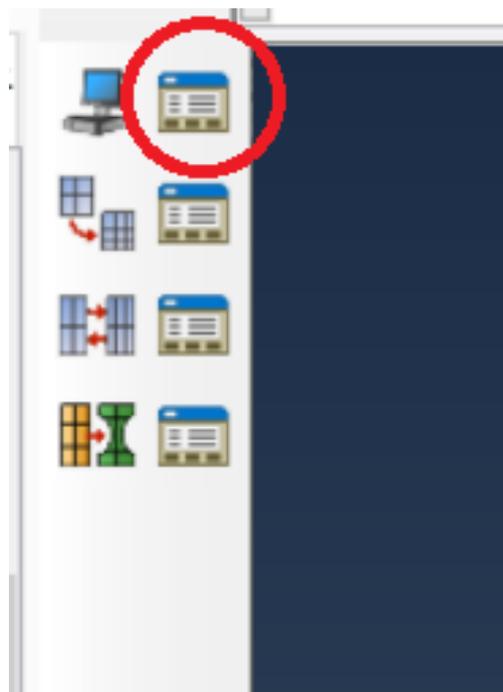
Fase 3 – Irá abrir um novo *menu*, apresentado na Figura 54, ele é apenas confirmando, mantendo-se o padrão de cálculo realizado pelo *software*.

**Figura 54** - Etapa de Cálculo – fase 3.



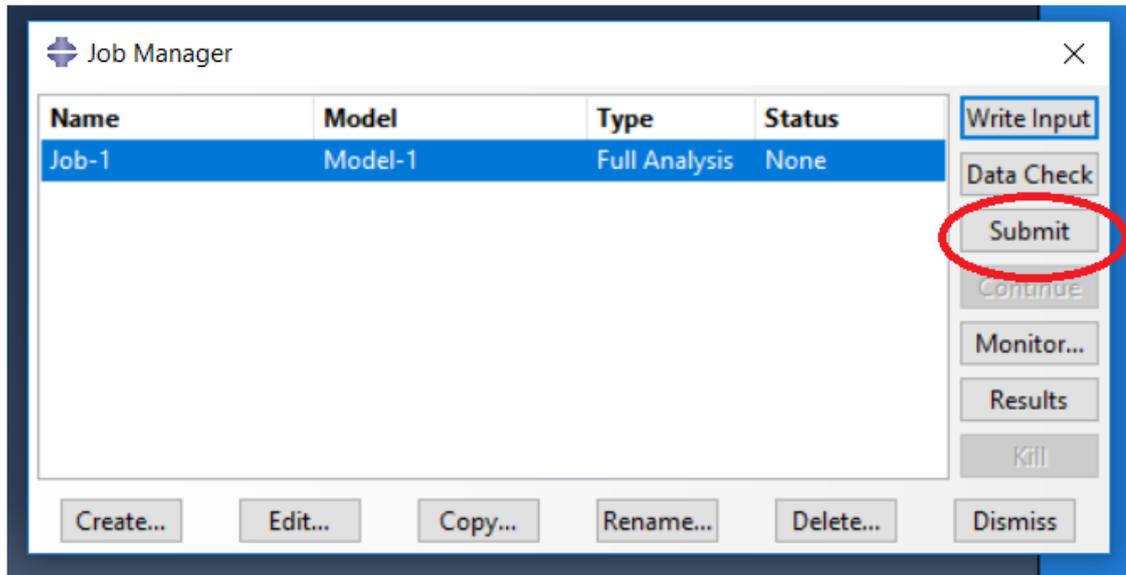
Fase 4 - A seguir, seleciona-se o *menu* referente ao cálculo (*Job Manager*), destacado na Figura 55.

**Figura 55** - Etapa de Cálculo – fase 4.



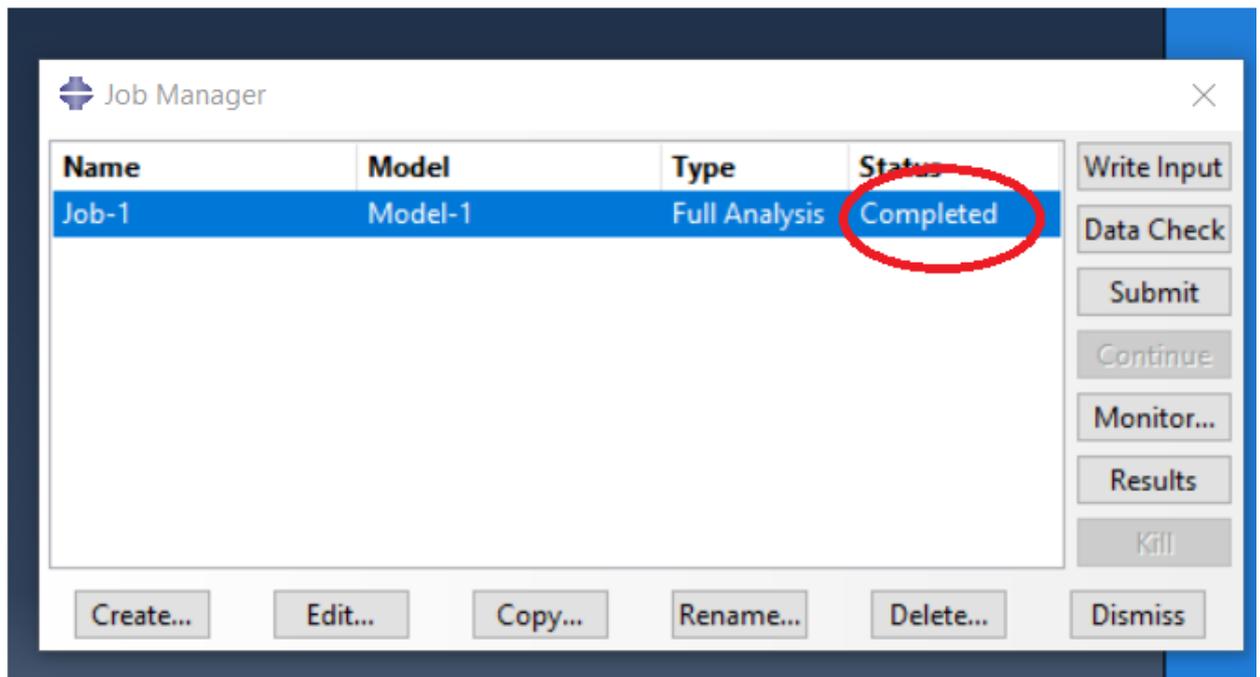
Fase 5 – Na janela que irá iniciar, seleciona-se a opção *submit*, destacada na Figura 56, para que o cálculo seja iniciado.

**Figura 56** - Etapa de Cálculo – fase 5.



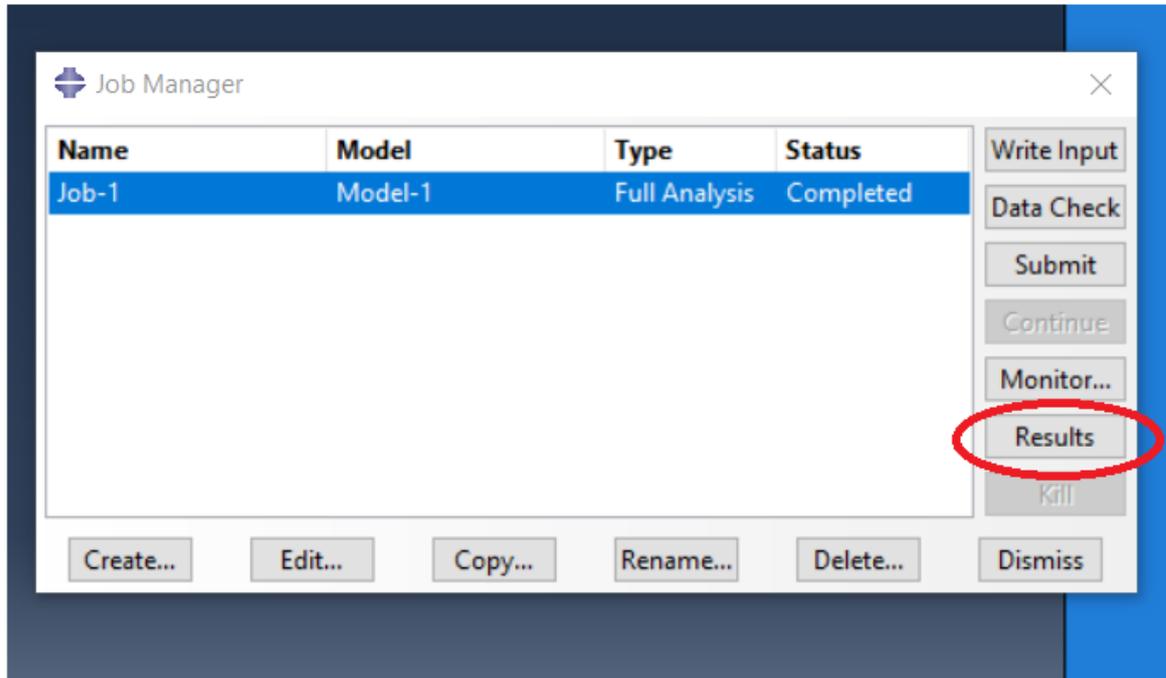
Fase 6 – Quando o cálculo do modelo for concluído o programa mostra uma mensagem de *Completed*, como a que aparece na Figura 57.

**Figura 57** - Etapa de Cálculo – fase 6.



Fase 7 – Finalmente, seleciona-se a opção dos resultados (results), destacada na Figura 58, e os resultados obtidos no modelo são apresentados.

**Figura 58** - Etapa de Cálculo – fase 7



## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises realizadas neste trabalho. Para cada modelo, avaliaram-se as deformações de tração na fibra inferior da camada betuminosa, de modo ser possível a validação dos resultados obtidos pelo sistema de camadas elásticas e o MEF.

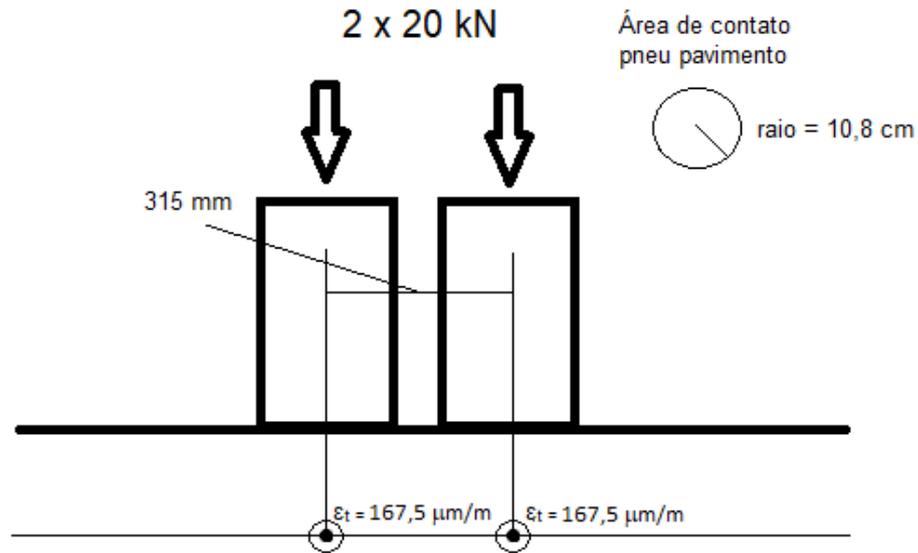
### 4.1 Eixo Padrão equivalente

Considerando o fato de não ser viável para a modelagem desejada em MEF 2D no ABAQUS a representação da carga do eixo simples de roda dupla de 8,2 tf (80 kN), ou seja, o eixo rodoviário padrão brasileiro, foi necessário o cálculo de um eixo equivalente.

Foi calculada com o programa de camadas elásticas BISAR a deformação de tração na parte inferior da camada de revestimento no eixo da roda, a partir da estrutura do pavimento genérico apresentada na Figura 13. Nesta estrutura e para o eixo padrão (simples de roda dupla), obteve-se uma deformação de 167,5  $\mu\text{m}/\text{m}$ , no sentido longitudinal. Esta deformação considera a carga de 40 kN (metade do valor do eixo) distribuída em dois círculos de raio 10,8 cm, totalizando uma pressão de 545.800 Pa sob a área desses círculos.

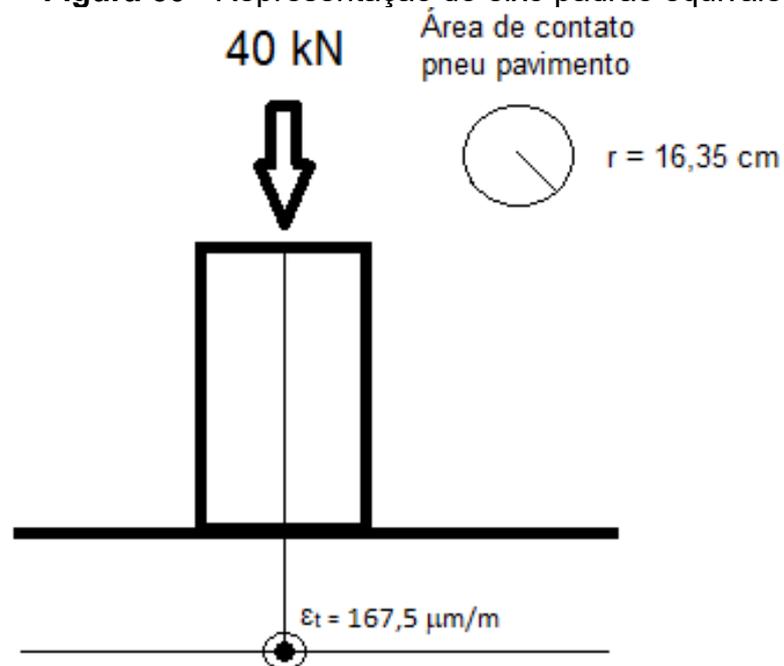
Na Figura 59 apresenta-se o eixo padrão, bem como a deformação de tração correspondente ao sentido longitudinal. Ressalta-se que este sentido é em relação à passagem da roda, ou seja, como a imagem apresenta um corte transversal essa deformação é representada “entrando” na imagem. É perceptível que para calcular esta deformação o sistema 2D deve partir de um corte longitudinal, e nesta situação, uma das duas cargas não poderia ser representada.

**Figura 59 - Representação do eixo padrão**



Como não é possível representar as duas áreas, é necessário encontrar uma área que possua o mesmo efeito. Através de um processo iterativo, utilizando-se novamente do *software* BISAR, determinou-se um raio de contato pneu pavimento, que gerasse a mesma deformação do eixo padrão, só que para a carga de 40 kN distribuída em uma única área circular. O raio da área de contato pneu pavimento encontrado para eixo padrão equivalente foi de 16,35 cm. A Figura 60 apresenta o eixo padrão equivalente encontrado.

**Figura 60 - Representação do eixo padrão equivalente**



## 4.2 Modelos 2D

Foram desenvolvidos no total três modelos planos 2D e suas dimensões foram definidas por razões do comprimento no qual distribuiu-se a carga neles atuantes. O comprimento correspondeu 2 vezes o raio calculado para a área de contato circular do eixo padrão equivalente (16,35 cm), ou seja, 32,7 cm.

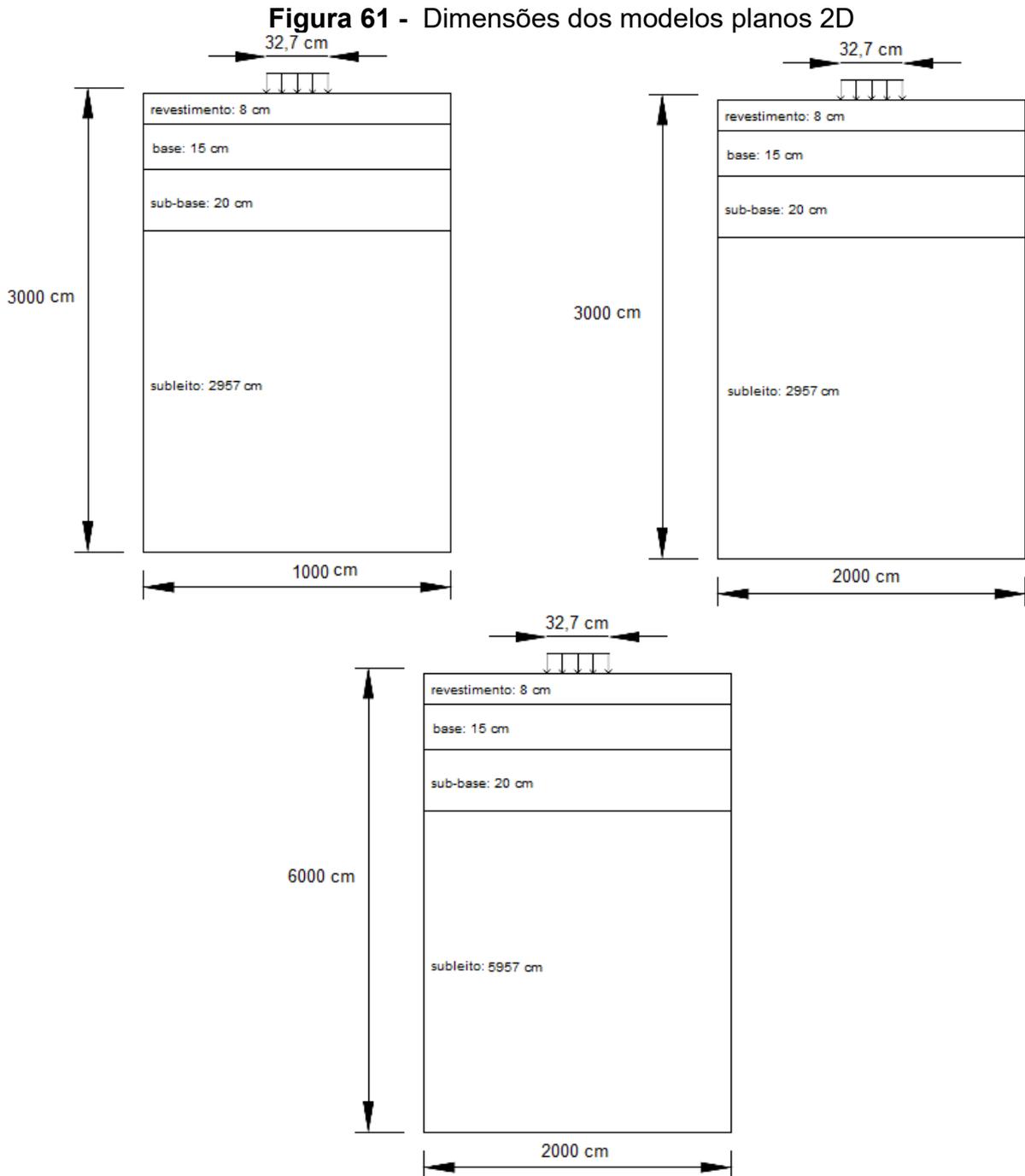
Os três modelos foram concebidos com 870 elementos (30 x 29) de tipo CPS4R, um elemento quadrilátero de 4 nós bi-linear de tensões planas, integração reduzida e controle dos modos espúrios. Houve restrição de movimentação na horizontal para as laterais dos modelos, e a extremidade inferior ficou restrita para movimentos horizontais e verticais. A carga aplicada à área de contato foi pressão exercida pela distribuição da carga do eixo (40 kN) na área de um círculo de raio igual ao raio de contato pneu pavimento do eixo padrão equivalente (0,0840 m<sup>2</sup>), ou seja, uma pressão de 476.293 Pa.

O primeiro dos modelos planos, com dimensões de 10 m x 30 m, correspondentes a 30,58 vezes o valor do comprimento da carga para a dimensão horizontal e 91,74 vezes esse valor na dimensão vertical.

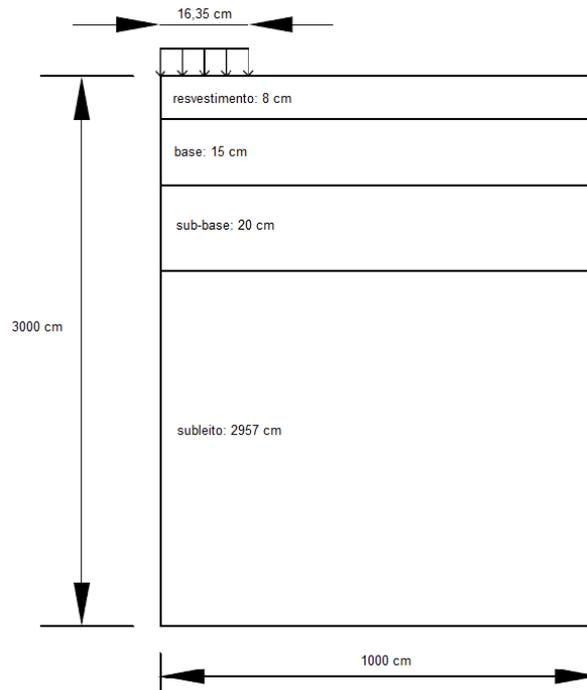
O segundo modelo, teve as dimensões de 20 x 30 m, correspondendo, respectivamente, para as dimensões horizontal e vertical, 61,16 e 91,74 vezes o comprimento.

O último modelo teve dimensões de 20 x 60 m, que corresponderam a 61,16 vezes o valor do comprimento de distribuição da carga na horizontal, e 183,49 vezes na vertical.

A Figura 61 apresenta as principais dimensões dos modelos 2D planos e suas correspondentes variações.



O modelo axissimétrico foi desenvolvido com as dimensões de 10 x 30 m, correspondentes à 61,16 vezes o raio do eixo padrão equivalente (16,35 cm) para a dimensão horizontal, e 183,49 vezes para a dimensão vertical. A mesma pressão dos modelos planos foi aplicada neste modelo, composto por 928 elementos (29 x 32) de tipo CAX4R, um modelo quadrilátero de 4 nós bi-linear axissimétrico, de integração reduzida e controle dos modos espúrios. A Figura 62 apresenta as principais dimensões deste modelo.

**Figura 62 - Dimensões do modelo axissimétrico**

#### 4.3 Deformações

Após a construção dos modelos no *software*, foi realizado o procedimento de cálculo do qual retirou-se os valores de deformação de tração para a fibra inferior da camada asfáltica (no eixo da carga), os resultados obtidos para estas deformações estão apresentados na Tabela 2, bem como o valor calculado no BISAR para comparação. Da mesma forma, o correspondente número N de cada modelo, calculado utilizando a Lei de Fadiga da mistura asfáltica estão apresentados.

**Tabela 2 - Resultados para os modelos planos**

Modelo	$\epsilon_t$ ( $10^{-6}$ m/m)	N
Bisar	167,40	$1,25 \times 10^6$
Axissimétrico	145,68	$2,19 \times 10^6$
Abaqus 10 x 30	182,49	$8,81 \times 10^5$
Abaqus 20 x 30	170,56	$1,16 \times 10^6$
Abaqus 20 x 60	170,40	$1,16 \times 10^6$

Como se observa por meio dos resultados da Tabela 2 a deformação de tração obtida do modelo axissimétrico foi inferior à calculada para os modelos planos, a mesma constatação foi apresentada na análise realizada por Ghadimi et.al. (2013).

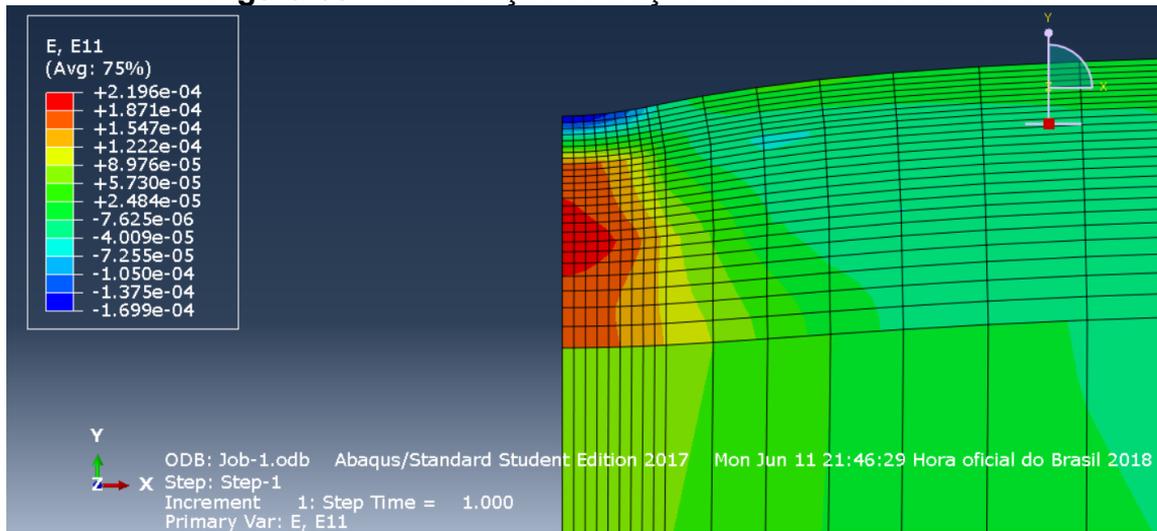
A deformação calculada para o modelo axissimétrico foi de 145,68  $\mu\text{m}/\text{m}$ , o que representa 87% do valor encontrado para a deformação pelo BISAR, 167,40  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Esta diferença de 13% nas deformações gera diferenças maiores quando se calcula o número N. O número N encontrado para o modelo axissimétrico foi de  $2,19 \times 10^6$  um valor 75% maior que o do BISAR ( $1,25 \times 10^6$ ). Logo, para o caso analisado, este modelo pode vir a superestimar a vida útil do pavimento, em relação ao método de dimensionamento tradicional.

A deformação calculada para os modelos planos foi equivalente para os modelos 20 x 30 m e 20 x 60, que obtiveram, respectivamente, 170,56  $\mu\text{m}/\text{m}$  e 170,40  $\mu\text{m}/\text{m}$ . O número N calculado por estes dois modelos foi de  $1,16 \times 10^6$ , cerca de 8% menor que o calculado pelo BISAR ( $1,25 \times 10^6$ ), um valor bem próximo se comparado ao modelo axissimétrico.

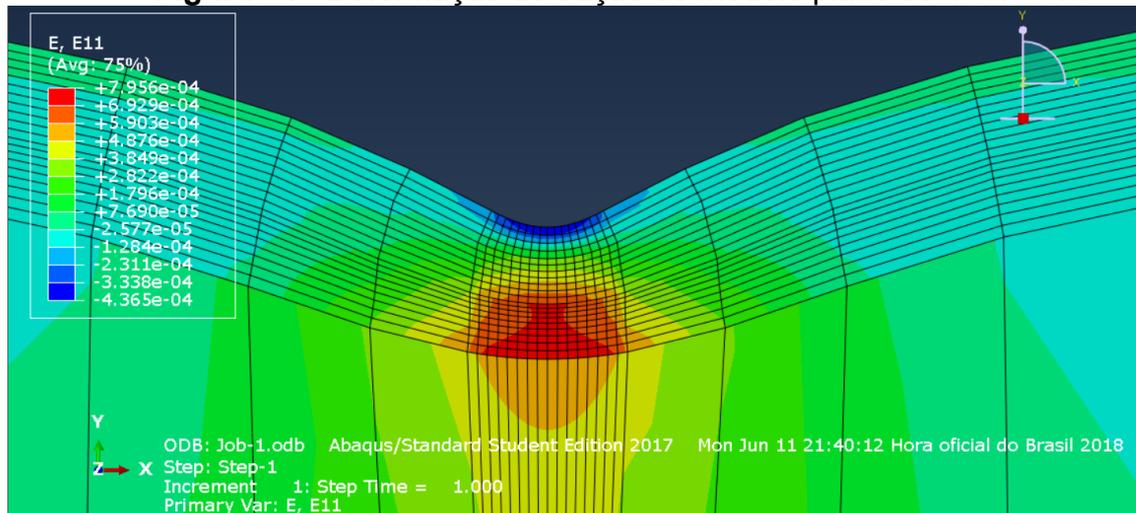
Por outro lado, o modelo de 10 x 30, obteve uma deformação maior que os outros dois modelos planos em cerca de 7%, 182,49  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Quando determinado seu número N este verificou-se inferior aos demais, uma vez que a deformação obtida foi a maior entre os modelos. O N de valor  $8,81 \times 10^5$  representa apenas 65% do valor encontrado no BISAR ( $1,25 \times 10^6$ ). Neste caso, se este fosse o modelo considerado representativo do MEF, a estrutura estaria subdimensionada por mostrar um N igual à  $10^5$  (uma ordem de grandeza inferior à de projeto  $10^6$ ). Como solução, a espessura da camada de revestimento deveria ser aumentada.

A distribuição das deformações de tração dos modelos de MEF estão ilustradas nas Figura 63 à Figura 66. Nessas figuras foi possível observar que no modelo axissimétrico, as maiores concentrações de deformação concentraram-se entre as camadas de base e sub-base, enquanto que para os modelos planos, as maiores deformações se encontraram na camada de sub-base. A influência da sub-base pode ter sido um fator que impactou em uma menor deformação para a fibra inferior da camada de revestimento.

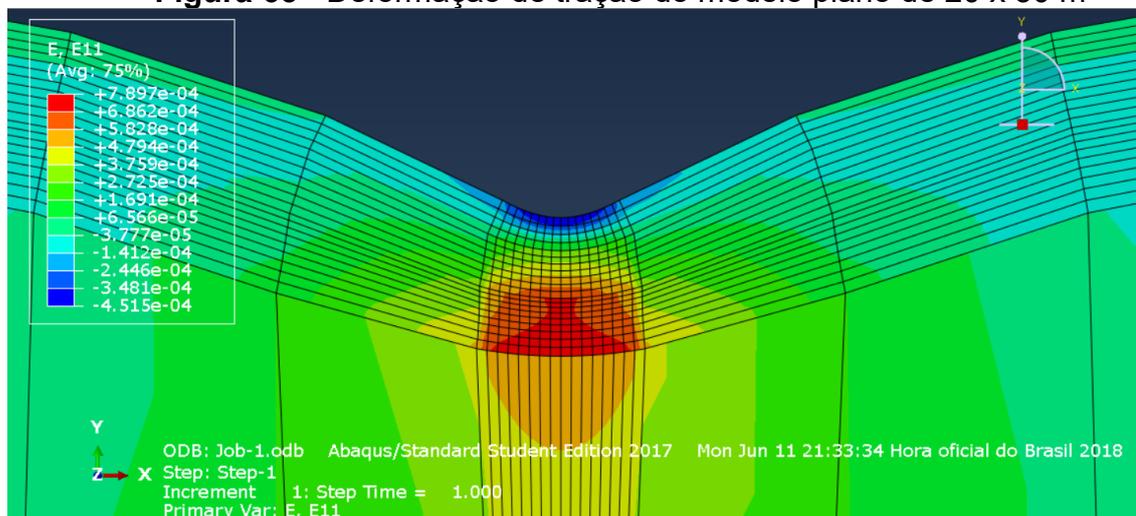
**Figura 63 - Deformação de tração do modelo axissimétrico**



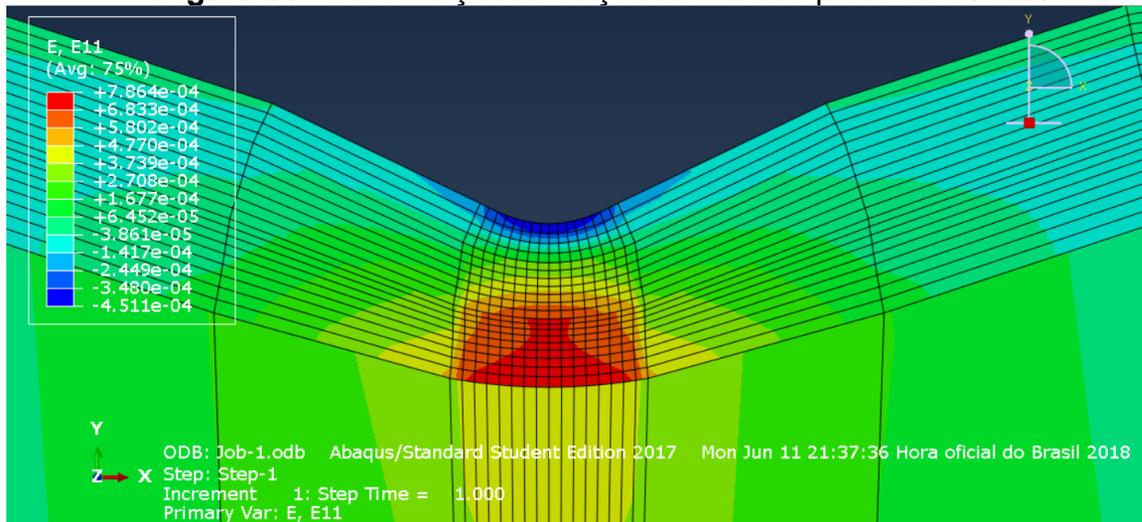
**Figura 64 - Deformação de tração do modelo plano de 10 x 30 m**



**Figura 65 - Deformação de tração do modelo plano de 20 x 30 m**



**Figura 66 - Deformação de tração do modelo plano de 20 x 60 m**



É importante ressaltar que enquanto o modelo plano apresentou a deformação de tração no sentido longitudinal, o modelo axissimétrico apresentou uma tração radial, ou seja, para o último ela é considerada igual em todos os sentidos.

Com o uso das ferramentas disponíveis, observou-se que os modelos planos de 20 x 30 m e 20 x 60 m foram suficientes para se realizar um dimensionamento aproximado de um pavimento asfáltico, com resultados equivalentes ao sistema de camadas elásticas usadas em auxílio ao método de dimensionamento empírico-mecanicista, atualmente empregado.

O principal objetivo desse trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível validar a modelagem em MEF a partir de um sistema de camadas elásticas. É importante ressaltar que a ideia foi desenvolver, principalmente, um processo metodológico de uso do MEF para estudantes de graduação. Como uso de 2D a carga necessitou de uma transformação em uma carga equivalente. Esse trabalho representou um primeiro passo ao uso do MEF em estruturas e dimensionamento de pavimentos rodoviários.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância da modelagem de pavimentos por métodos como os elementos finitos é subestimada pelos cursos de graduação, nos quais dificilmente o aluno tem contato com esta ferramenta. O aluno é usualmente apresentado apenas aos métodos tradicionalmente aplicados, sem que haja uma introdução a métodos mais modernos.

Através das análises deste trabalho foi possível realizar um primeiro contato com o método dos elementos finitos para a análise de pavimentos, observando parte de suas ferramentas e possibilidades.

Durante o trabalho através do método dos elementos finitos foram desenvolvidos com o auxílio do ABAQUS dois tipos de modelos 2D, plano e axissimétrico. Os modelos planos apresentaram-se de modo geral, resultados mais conservadores que o método tradicional de dimensionamento, neste trabalho representado pelo uso do BISAR. O axissimétrico, por sua vez, apresentou resultados que podem ser considerados otimistas, em relação a metodologia usual.

As análises realizadas por este trabalho buscaram apenas um primeiro contato com a o método dos elementos finitos, contudo, os resultados obtidos demonstraram parte do potencial do método dos elementos finitos, que apresentou resultados satisfatórios, mesmo com uma análise simplificada, demonstrando que novos horizontes podem ser abertos para o processo de dimensionamento, caso os modelos utilizados para estas análises sejam aprimorados.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Utilizar um modelo 3D como base para a comparação entre modelos 2D;
- Realizar o estudo com o uso de um modelo 3D;
- Considerar o comportamento visco-elástico da camada de revestimento;
- Realizar as análises com uma gama maior de propriedades físicas na composição dos sistemas;
- Realizar análises que considerem diferentes tipos de eixos e suas características, como novas cargas, diferentes pressões de insuflagem, e áreas de contato pneu pavimento.



## REFERÊNCIAS

ASSAN, Aloisio Ernesto. **Método dos elementos finitos: primeiros passos.** – 2ª Edição – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro, Brasil: PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos), 2008.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos Rodoviários.** Portugal, Coimbra: Almedina, out. 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa; Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentação.** 3 Ed. – Rio de Janeiro, 2006

\_\_\_\_\_. Norma DNIT 005/2003 – TER. **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos Terminologia.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. Norma DNIT 031/2006 – ES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). **DNER-ME 049/94: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Método de Ensaio do DNER,** 1994.

DUNCAN, J. M.; MONISMITH, C. L.; WILSON, E. L. **Finite Element Analyses of Pavements.** Highway Research Record Highway Research Board, Washington, 1968.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho, 2009.

GHADIMI, Behzad; ASADI, Hossein; NIKRAZ, Hamid; LEEK, Colin. **Effects of Geometrical parameters on Numerical Modeling of Pavement Granular Material.** Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements., 2013.

HADI, Muhammad N. S.; BODHINAYAKE, B. C. Non-Linear finite element analysis of flexible pavements. **Advances in Engineering Software,** Elsevier, n. 34, p. 657 – 662, 2003.

LOPES, Óscar Miguel Moreira. **Misturas Betuminosas – Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos.** Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto, 2009.

MONISMITH, C. L. **Fatigue Characteristics of Asphalt Paving Mixtures and Their Use in Pavement Design**. Estados Unidos, Albuquerque, University of New Mexico, 18<sup>th</sup> Paving Conference, 1981.

MULUNGYE, R. M.; OWENDE, P. M. O.; MELLON, K. Analysis of Response of Flexible Pavements Using Finite Element Method. **The ITB Journal**. Vol. 6. Iss. 2, Article 5.

ORR, David P. **Mechanistic-Empirical Pavement Design**. Cornell Local Roads Program. 64 slides. Disponível em: <https://www.slideshare.net/mecocca5/mechanistic-empirical-pavement-design-compatibility-mode> . publicado em 6 set. 2011, acesso: 11 jun. 2018.

PERRET, J; **Déformation des couches bitumineuses au passage d'une charge de traffic**. Tese (Doutorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Lausanne, France. 2003.

Shell International Oil Products B. V. **Bisar 3.0 User Manual**. Bitumen Business Group, maio 1998.

SORIANO, Humberto Lima. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. Brasil, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

SOUZA, Murillo Lopes de. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Divisão de Informática Técnico-científica. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3 Ed. – Rio de Janeiro, 1981.

ZEIADA, Waleed. **Endurance limit for HMA based on healing phenomenon using continuum damage analysis**. Tese (Doutorado). Arizona State University, 2012